



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

HEIKKI HUKKANEN

LASKENTAOHJEEN ESISELVITYS, VANTAANJOEN JA KERA-
VANJOEN STABILITEETTITARKASTELUT

Diplomityö

Tarkastaja: professori Tim Länsivaara
Tarkastaja ja aihe hyväksytty Rakenne-
tun ympäristön tiedekuntaneuvoston ko-
kouksessa 6.kesäkuuta 2012

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Rakennustekniikan koulutusohjelma

HUKKANEN, HEIKKI: Laskentaohjeen esiselvitys, Vantaanjoen ja Keravanjoen stabiliteettitarkastelut

Diplomityö, 136 sivua, liite CD

Helmikuu 2013

Pääaine: Yhdyskuntarakentaminen

Tarkastaja: professori Tim Länsivaara

Avainsanat: Stabiliateetti, Vantaa, Vantaanjoki, Keravanjoki, huokosveden ylipaine, huokospaineparametri, jokiuoman stabiliteetti

Vantaan kaupungin alueella kulkee kaksi merkittävää vesistöä, Vantaanjoki ja Keravanjoki sivuhaaroinen. Jokien vaikutusalueella asuu yli miljoona kansalaista ja yhdyskuntarakenteen tiivistyessä tarve rakentaa yhä tehokkaammin myös jokivarsille kasvaa jatkuvasti.

Jokiuomien vakavuus tulee tutkia aina, kun rakentaminen ulottuu alueille, jotka voivat vaikuttaa jokiuoman stabiliteettiin. Eri tahojen tekemien tarkastelujen kirjo on laaja, sillä ohjeistusta vakavuustarkastelujen tekemiselle Vantaan alueella ei ole olemassa. Tässä työssä pyritään luomaan pohjaa yhtenäiselle laskentaohjeelle.

Työssä Vantaan alueen erityispiirteitä tutkittiin neljän tutkimuskohteen avulla. Kahdella kohteella tehtiin täydentäviä pohjatutkimuksia ja laboratoriokokeita. Työssä on esitelty tutkimuskohteet ja merkittävimmät Vantaan joet, sekä käsitelty jokien stabiliteettiin vaikuttavia tekijöitä. Tutkimusten perusteella tehtiin vakavuustarkasteluja erilaisilla laskentamenetelmillä lähinnä Geocalc- laskentaohjelmaa käyttäen. Käytetyt laskentamenetelmät ja laskentaparametrien määrittäminen ovat esitelty ennen laskelmia. Työssä käsitellään myös uutta tapaa huomioida huokosvedenpaineen vaikutusta yksinkertaisissa laskelmissa huokospaineparametria r_u :a käyttäen.

Merkittävämmät havainnot pohjatutkimusten perusteella olivat yleisesti savikerroksesta määritetyt varsin heikot siipikairalujuudet. Huomioitava havainto on myös paikoin lujittunut jokipenger. Kolmiaksaalikokeilla määritetty saven kitkakulma, ja sen avulla laskettu saven leikkauslujuus osoittautui tutkimuskohteilla olevan poikkeuksesta siipikairalla määritettyä suljettua leikkauslujuutta huomattavasti parempi. Siipikairalla maan suljettua leikkauslujuutta määritettäessä päädytään usein aliarvioimaan maan todellista lujuutta.

Laskentamenetelmistä parhaimmaksi osoittautui GLE- menetelmää vapaata liukupintaa ja huokospaineparametria r_u käyttäen sekä mahdollinen jokipenkereen lujittuminen huomioiden. Tällä tavoin tehdyt laskelmat antoivat hyvin lähelle samanlaisia tuloksia kuin elementtimenetelmällä lasketut vertailulaskelmat Plaxis- ohjelmalla.

Tutkimusten ja laskelmien perusteella työssä on esitetty Vantaan alueelle esitys laskentaohjeen sisällöstä, sekä laadittu stabiliteettilaskennan kulkukaavio. Lopuksi kaavion mukainen stabiliteettitarkastelu on viety läpi esimerkkikohteen avulla.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Civil Engineering

HUKKANEN, HEIKKI: Pre-Report for Guidelines of stability calculations, Vantaa river and Kerava river stability analysis

Master of Science Thesis, 136 pages, Appendix CD

February 2013

Major: Civil Engineering

Examiner: Professor Tim Lämsivaara

Keywords: Stability analysis, Vantaa River, Kerava River, pore pressure, excess pore pressure parameter, river bed stability

In the City of Vantaa area, there are two major waterways, the Vantaa River and Kerava River with branches. Over one million people live in the river area. As the community structure is getting denser all the time, there is an increasing need to build more efficiently also along the riverside.

River bed stability should be checked each time when construction extends to areas that may affect the stability of the river channel. As there are no guidelines for doing stability analysis along Vantaa rivers, there is quite a large variability in how different consultants have done their calculations.

In this work the specific features of Vantaa has been investigated in four different research regions. All of the research regions as well as the most important rivers in Vantaa and main the factors affecting the river bed stability are presented in this work. By using information from ground investigations and laboratory tests, several stability analyses have been done mainly using the Geocalc- software. Used calculation methods and the determination of the soil parameters are presented before calculations. In this work a new way to account for the impact of excess pore pressure is presented applicable for simple calculation using pore pressure parameter ru .

The most significant finding of the ground investigations were generally that the undrained shear strength determined by the vane test was very small for some layers. An important observation was also that the strength was higher in the river bank than further way from the river. Friction angles determined by triaxial tests showed a much higher strength for the clay than vane tests. Using vane test it is very typical to underestimate undrained shear strength.

The best calculation method proved to be the GLE-method applying a non-circular sliding surface and the excess pore pressure parameter. Making calculations that way, results were quite similar to comparative calculations which were made using Plaxis-software.

Based on analysis of Investigations and calculations made, the content for guidelines for stability calculations in Vantaa region is presented, as well as stability analysis flow chart. Finally the proposed stability analyses have been done for an example case in the Vantaa region. Finally the stability analyses have been exported through with the example region.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Ramboll Finland Oy:ssa ja työn on tilannut Vantaan kaupunki. Kiitän Vantaan kaupunkia, joka on mahdollistanut työn tilaamisen myötä osallistumisen mielenkiintoiseen selvitystyöhön. Erityisesti haluan kiittää Heikki Kangasta, Matti Holtaria ja Anna-Kaisa Karhusta saamastani avusta työn tekemiseen.

Työn ohjauksesta ja neuvoista erityiskiitokset työn ohjaajalle, Juho Mansikkamäelle Ramboll Finland Oy:sta. Juhon ansiokkaat neuvot, ohjaustuokit ja palautteet ovat olleet työn valmistumisen kannalta välttämättömiä. Kiitokset myös professori Tim Länsivaaralle, Tampereen teknilliseltä yliopistolta, neuvoista työn tekemiseen ja ansiokkaasta tutkimustyöstä, jota työssä hyödynnetään.

Kiitokset kuuluvat myös Ramboll Finland Oy:lle, joka on mahdollistanut diplomityön tekemisen tehokkaasti ja joustavasti.

SISÄLLYS

1	Johdanto.....	1
1.1	Taustaa.....	1
1.2	Tavoitteet	2
1.3	Työn menetelmät ja rajaukset	2
2	Vantaan joet.....	3
2.1	Vantaanjokilaakso	3
2.1.1	Vantaanjoki	4
2.1.2	Keravanjoki	5
2.1.3	Rekolanoja	6
2.2	Savipohjaisten jokilaaksojen sortumamekanismit	7
2.3	Vantaanjokilaakson ominaispiirteitä	9
2.3.1	Tulvaherkkyys	9
2.3.2	Sortumat	10
2.4	Alueen geotekniset ominaisuudet.....	11
2.4.1	Geotekniset muodostumat.....	11
2.4.2	Muodostumien geotekniset ominaisuudet.....	12
3	Tutkittavat alueet.....	13
3.1	Pirttiranta	14
3.2	Tammisto	16
3.3	Vallinoja.....	18
3.4	Ohratie	20
4	Stabiliateettilaskennan teoria.....	23
4.1	Lamellimenetelmät	23
4.1.1	Bishopin menetelmä	24
4.1.2	Morgestern-Price/GLE.....	25
4.1.3	Huomioita käytössä olevista menetelmistä	27
4.2	Elementtimenetelmä	28
4.2.1	Yleistä	28
4.2.2	Plaxis-ohjelma	29
4.3	Huokosvedenpaine	31
4.3.1	Huokosylipaineen muodostuminen	31
4.3.2	Huokospaineen huomiointi laskelmissa.....	33
5	Yleiset havainnot tehdyistä tutkimuksista	37
5.1	Yleistä	37
5.2	Jokipenkereen lujittuminen.....	37
5.2.1	Syitä maan lujittumiseen	42
5.2.2	Lujittuneen penkereen huomiointi laskelmissa	44
5.3	Tutkimustulosten yleispiirteitä.....	46
5.3.1	Rakeisuudet ja vesipitoisuudet	46
5.3.2	Ödometrikokeet	48

5.3.3	Kartiokokeet.....	49
5.3.4	Siipikairatulokset.....	51
5.3.5	Kolmiaksiaalikoheet	58
6	Tutkimustulokset tutkimuskohteittain.....	60
6.1	Pirttiranta	60
6.1.1	Tehdyt tutkimukset	60
6.1.2	Tutkimustulokset ja laskentaparametrit	61
6.2	Case Ohratie	68
6.2.1	Tehdyt tutkimukset	68
6.2.2	Tutkimustulokset ja laskentaparametrit	70
6.3	Vallinoja.....	75
6.3.1	Tehdyt lisätutkimukset.....	75
6.3.2	Tutkimustulokset ja laskentaparametrien määrittäminen	76
6.4	Tammisto	82
6.4.1	Tehdyt tutkimukset	82
6.4.2	Tutkimustulokset ja laskentaparametrien määrittäminen	83
7	Laskelmat.....	86
7.1	Yleistä	86
7.2	Pirttiranta	87
7.3	Ohratie	95
7.4	Vallinoja.....	101
7.4.1	Leikkaus A-A	101
7.4.2	Leikkaus B-B.....	106
7.5	Tammisto	109
8	Yhteenveto.....	113
8.1	Yleistä	113
8.2	Suositus ohjeen sisällöstä.....	115
8.2.1	Pohjatutkimusten määrän ja menetelmien arviointi	115
8.2.2	Pohjatutkimusmenetelmät	115
8.2.3	Laskentamenetelmät	116
8.2.4	Stabiiliteettitarkastelun toimintamalli.....	116
	Lähdeluettelo	118
	LIITE 1. CASE VALLINOJA.....	121
	Liite CD:	
	-Pirttiranta (kuvat, laskelmat, laboratoriotulokset)	
	-Tammisto (kuvat, laskelmat, laboratoriotulokset)	
	-Vallinoja (kuvat, laskelmat, laboratoriotulokset)	
	-Ohratie (kuvat, laskelmat, laboratoriotulokset)	
	-Tutkimusselostukset	

TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT

FEM	Elementtimenetelmä (Finite Element Method)
HW	Ylivesi, tietyn aikajakson ylin vedenkorkeus
MC	Mohr-Coulomb- materiaalimalli
MQ	keskivirtaama, tietyn ajanjakson keskimääräinen virtaama
MW	Keskivesi, tietyn aikajakson keskimääräinen vedenkorkeus
MHQ	Keskiylivesi, tietyn aikajakson ylimpien vedenkorkeuksien keskiarvo
NW	Alivesi, tietyn aikajakson alin vedenkorkeus
FOS	kokonaisvarmuus (Factory Of Safety)
LEM	rajatasapainomenetelmä (Limit Equilibrium Method)
POP	vakio ylikonsolidaatiojännitys (Pre-Overburden Pressure)
SS	Soft Soil – materiaalimalli
F	kokonaisvarmuus [-]
K_0^{NC}	maanpaine kerroin [-]
M	kriittisen tilan murtosuoran kaltevuus [-]
P	ympyrän piiri
R	ympyrän säde
S	leikkauslujuus
S_u	suljettu leikkauslujuus [kN/m^2]
c	koheesio [kN/m^2]
e	huokosluku [-]
h	korkeus [m]
k_1	murtosuoran kaltevuus
p'	tehokas keskimääräinen jännitys [kN/m^2]
q	deviatorinen jännitys [kN/m^2]
w	vesipitoisuus [%]
u	huokospaine [kPa]
u_{ey}	myötömurtumisen aiheuttama huokospaineen kasvu [kPa]
u_r'	huokospaine parametri [-]
φ	kitkakulma [°]
φ_c	kriittisen tilan kitkakulma [°]
φ'	tehokas kitkakulma [°]
γ	tilavuuspaino [kN/m^3]
γ_w	veden tilavuuspaino [10 kN/m^3]
σ_n'	tehokas normaalijännitys [kN/m^2]
σ_n	normaalijännitys [kN/m^2]

σ_{cv}	esikonsolidaatiojännitys [kN/m ²]
τ	leikkausjännitys [kN/m ²]
τ_f	murtotilan leikkauslujuus [kPa]
τ_e	tasapainotilan leikkauslujuus [kPa]
θ_k	keskuskulma [°]
λ^*	SS-mallin mukainen tilavuudenmuutosparametri (NC)
κ^*	SS-mallin mukainen tilavuudenmuutosparametri (OC)
ν	Poisson luku [-]

1 JOHDANTO

1.1 Taustaa

Vantaan kaupungin alueella kulkee kaksi merkittävää vesistöä, Vantaanjoki ja sen sivuhaara Keravanjoki. Molemmille joille on omaleimaista sijainti voimakkaasti rakennetussa ja asutussa ympäristössä. Jokien vaikutusalueella asuu yli 1 000 000 kansalaista. Joet kulkevat monin paikoin pehmeillä savikoilla ja niiden virtaaman vaihtelu on suurta, mikä yhdessä rakennetun ympäristön kanssa vaikuttaa jokiuomien vakavuuteen. Yhdyskuntarakenteen tiivistyessä ja tilantarpeen kasvaessa jokivarret ovat kuitenkin haluttua rakennusaluetta.

Jokiuomien vakaavuus tulee tutkia aina, kun rakennustöiden vaikutusalue ulottuu sortumille alttiille alueille. Jokipenkereen sortumalla voi olla paikallisten henkilö- ja materiaalivahinkojen lisäksi kerrannaisvaikutuksia uoman tukkiutuessa. Jo jokiuoman osittainen tukkeutuminen voi tulvaherkässä vesistössä aiheuttaa merkittäviä tulvia, joiden aiheuttamat vahingot voivat olla mittavia. Maankäytön tehostaminen jokien läheisyydessä on järkevää ja kannatettavaa, mutta siihen liittyvät riskit on pidettävä hallinnassa. Rakentamattomien alueiden lisäksi Vantaalla sijaitsee myös rakennettuja alueita, joiden vakavuutta tulee tarkastella riskienhallinnan kannalta. Jokiuomien vakavuuden tarkasteluun liittyy Vantaan kaupungin näkökulmasta kaksi puutetta; perinteisten laskentamenetelmien epätarkkuudet ja laskelmien tekemistä ohjaavan ohjeen puuttuminen.

Laskentamenetelmien epätarkkuudet ovat yleinen ongelma. Pehmeiden savien ja savikoiden vakavuuslaskenta ei ole ongelmatonta. Perinteinen S_u -menetelmä voi johtaa varmuuden aliarviointiin. Tällöin rakentamista rajoitetaan tarpeettomasti tai ryhdytään tarpeettoman mittaviin pohjanvahvistustoimenpiteisiin. Tarkempiin tuloksiin voidaan päästä laskentaparametreja ja pohjatutkimusten laatua ja tulkintaa parantamalla. Tehokaiden lujuusparametrien (ϕ' ja c') käyttö laskennassa voi taas johtaa varmuuden yliarviointiin, mikäli kuormitustilanteessa maahan muodostuvaa huokosylipainetta ei kyetä mallintamaan. Tampereen teknillisellä yliopistolla on kehitetty viime vuosina menetelmiä huokosylipaineen tarkempaan mallintamiseen ja tätä kautta tarkempiin vakavuuslaskennan tuloksiin.

Vantaan jokilaaksojen voimakas täydennysrakentamistarve on johtanut tilanteeseen, jossa kaupungin omat resurssit yksittäisten vakavuustarkasteluiden tekemiseen ovat riittämättömät. Toisaalta eri tahojen tekemien vakavuustarkastelujen kirjo on laaja yhte näisten toimintaohjeiden puuttuessa. Tarkoituksenmukaista olisi, että laskelmat tehtäisiin kaikkien osapuolten toimesta mahdollisimman yhdenmukaisesti ja yksiselitteisesti.

1.2 Tavoitteet

Työn tavoitteena on luoda pohja stabiliteetti-laskentaohjeelle, joka laaditaan Vantaan kaupungille. Työssä määritetään tarvittavat tutkimus- ja laskentamenetelmät, joiden avulla voidaan tutkittavan alueen vakavuustarkastelut tehdä yhdenmukaisesti, kenen tahansa riittävän ammattitaidon omaavan tahon toimesta. Työssä käsitellään myös vakavuuslaskennan suorittamista pehmeillä savilla ja siihen liittyvää parametrien määrittästä. Vertailulaskelmia tehdään sekä perinteisin laskentamenetelmin että uusimpia tutkimustuloksia hyödyntäen.

Työ tehdään tarkastelleen toisistaan poikkeavia, Vantaalla sijaitsevia kohteita. Kohteiden avulla tehdään vertailulaskelmia ja työstetään ohjeelle pohjaa Vantaan ominaispiirteet huomioiden. Yhden kohteen osalta tuotetaan tulevan rakentamistoimien vaatimaa pohjatutkimustietoa ja vakavuustarkasteluja.

1.3 Työn menetelmät ja rajaukset

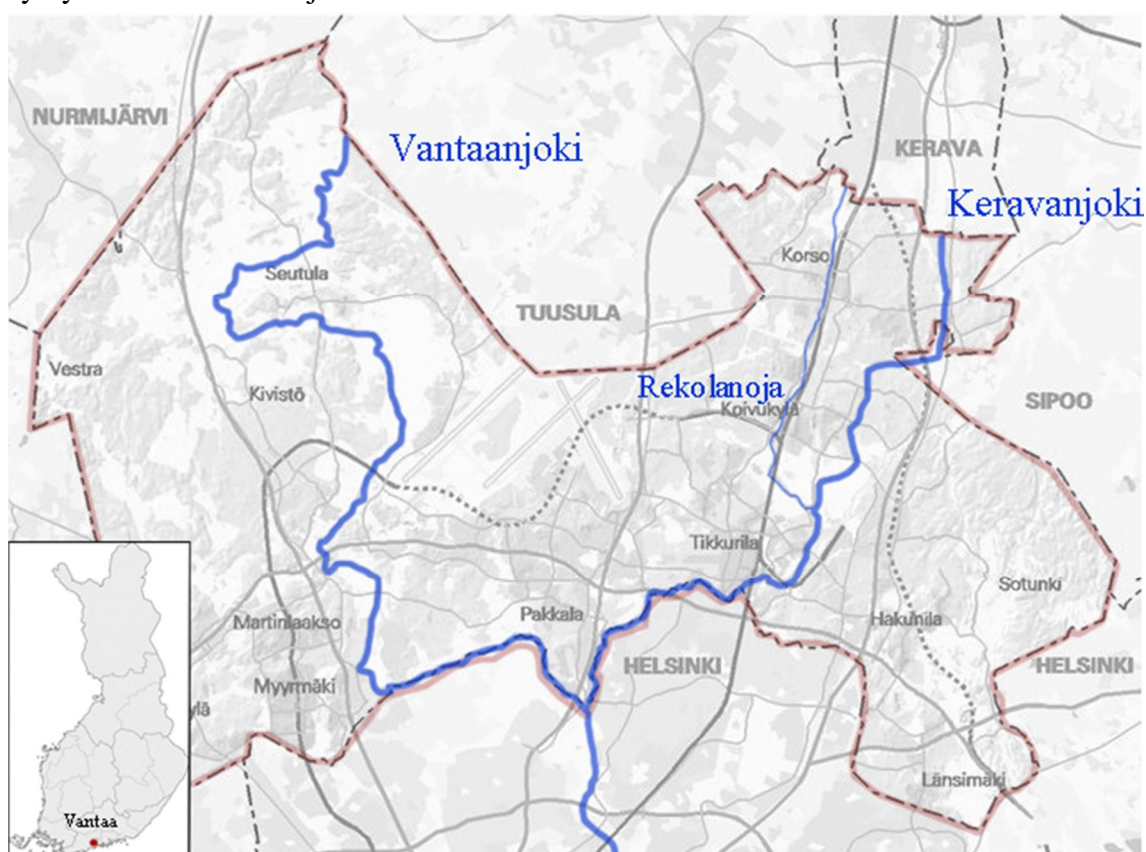
Työssä tarkastellaan kolmea Vantaan kaupungin olemassa olevaa tai tulevaa asuinaluetta. Kahden kohteen osalta hyödynnetään olemassa olevia pohja- ja laboratoriotutkimuksia. Yhden kohteen osalta tehdään työn yhteydessä tarvittavat pohjatutkimukset. Kohteiden avulla vertaillaan eri laskentamenetelmien tuloksia ja arvioidaan niiden soveltuvuutta vallitseviin olosuhteisiin. Kustakin kohteesta valitaan tutkittavat poikkileikkaukset joiden avulla tarkastelut tehdään. Laskentatulosten ja laboratoriotestien perusteella laaditaan ehdotelma jatkossa tehtävän laskentaohjeen sisällöstä. Työssä ei perehdytä laboratoriotestien tekemiseen tai niiden teoriataustoihin. Laskentamenetelmien teoria selvitetään tarvittavilta osin. Vertailulaskelmia varten käytettävää elementtimenetelmää ei työssä syvällisesti käsitellä.

Työn lopussa viedään yhden kohteen vakavuustarkastelu-prosessi läpi tehdyn ehdotelman mukaisesti. Case-tyyppinen käsittely luo esimerkkitapauksen vakavuustarkasteluiden tekemisestä. Kohteen tutkimuksia ja laskentatuloksia voidaan hyödyntää kohteen jatkosuunnittelun yhteydessä.

2 VANTAAN JOET

2.1 Vantaanjokilaakso

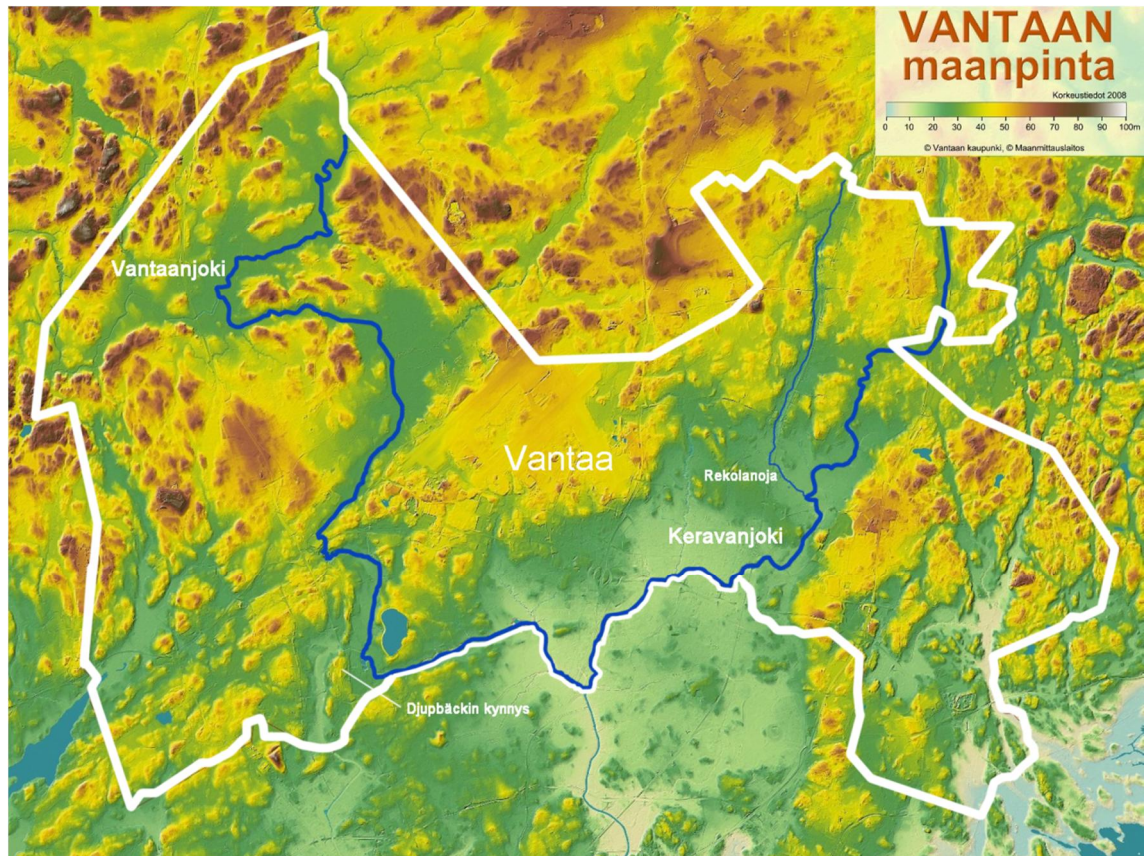
Vantaanjoen vesistöalueen syntyhistoria ajoittuu jääkauden jälkeiseen aikaan. Vantaanjoen vesistöalue vapautui mannerjäädä arviolta 12 000 vuotta sitten. Jäätikön sulamisen seurauksena aluetta peitti meri, jonne valtavat jäätikkövirrat laskivat. Syviin vesiin laskeutui ja kerrostui sulamisvesien kuljettama hienoaines jopa kymmenien metrien paksuisiksi savikerroksiksi. Jäätiköin reunan eteen kasaantui suuria reunamuodostumia, joista tunnetuimpia ovat salpausselät. Maan kohottua ja meren vetäydyttyä kauemmaksi alueelta pintavedet hakivat reittinsä savikoiden halki mereen. Vuosituhansien kuluessa syntyi Vantaan savikkojokivesistö. /2/



Kuva 2.1. Vantaanjoen, Keravanjoen ja Rekolanojan sijainti kartalla.

Vantaanjokilaakson merkittävimmät joet ovat sen pääuoma Vantaanjoki sekä Vantaanjoen sivuhaara Keravanjoki. Joet yhtyvät Vantaan ja Helsingin rajalla. Joet kulkevat Vantaan ja Helsingin alueella tasaisen ja paikoin yli 20 metriä paksun savikerrostuman päällä. Ainoastaan Vantaankoskella ja Pitkäkosken koskijaksolla jokiuoman pohja yltää laajemmin peruskallion pintaan. Jokiuomaa ympäröivä laaja kallio- ja moreenimäkien

ympäröimä savitasanko ei siis ole itse joen synnyttämä, vaan entistä jäätikön sulamisen seurauksena syntyneen mereen pohjaa. Jokilaakson alueesta lähes 40 % on savi- ja hiesumaita./3/



Kuva 2.2. Vantaan kaupungin korkeusmalli ja jokien sijainti.

Laajimmat savikkoalueet sijaitsevat valuma-alueen keski- ja eteläosassa Salpausselän eteläpuolella. Joki on muokannut tasankoa vain hyvin kapealta osalta, joten nimitys Vantaanjokilaakso on näin ollen geomorfologisesti harhaanjohtava. Varsinainen jokilaakso on U-muotoinen, kapea ja jyrkkärantainen. /3/

2.1.1 Vantaanjoki

Vantaanjoen vesistöalue sijaitsee tiheään asutun Uudenmaan ja Hämeen alueilla. Valuma-alueen pinta ala on lähes 1700 km² ja sen vaikutusalueella asuu tätä nykyä yli miljoona ihmistä. Valuma-alueen asukastiheys on kymmenkertainen maan keskiarvoon verrattuna. Vesistöalueen pääuoma, Vantaanjoki, alkaa Hämeen eteläosasta; Hausjärveltä ja mereen se laskee Helsingin Vanhankaupunginlahdella. Pituutta Vantaanjoella on lähes 100 km ja keskivirtaama on 17 m³/s /6/.

Vantaanjoki voidaan geologisen historian kautta jakaa kahteen eri osuuteen. 3000 - 4000 vuotta sitten Vantaanjoki laski Laajalahteen Pitäjänmäellä. Joen vanha ja nykyinen kulkureitti on esitetty kuvassa 2.3.



Kuva 2.3. Vantaanjoen vanhan uoman ja nykyisen uoman sijainti

Nykyisin Mätäjokena tunnettu vanha Vantaanjoen uoma on suuruudeltaan vain murto-osan alkuperäisestä pääuomasta. Nykyinen Mätäjoki virtaakin huomattavan leveässä laaksossa, minkä pohja on laajalti soistunut. Vesimäärältään ja laajuudeltaan Mätäjoen nykyinen uoma peittää siitä nyt vain pienen osan.

Suomessa joen kulun suunta on usein pienestä kiinni, koska eri suuntiin vievien laaksojen välillä korkeuserot voivat olla hyvin pieniä. Suurten virtaamien ja tulvien aikaan laaksojen väliset kynnykset saattavat ylittyä, jolloin vesi pääsee kuluttamaan patoavia kynnyksiä. Näin on käynyt myös Vantaanjoelle nykyisen Kaivoksen kohdalla. /17/. Ennen uoman siirtymistä, nykyisen joen länsipuolella Djupbäckin kynnys kohosi merestä muodostaen jokeen kosken. Kynnyksen kohdalla Vantaanjoen vedet syöksyivät kohti länttä. Vedenvirtaus kulutti jokiuomaa kynnyksen jälkeen, mutta itse kalliokynnystä vesi ei kuluttanut. Tämän vuoksi vedenpinta oli pysynyt kynnyksen yläpuolella lähellä jokiäyriä. Ilmeisesti äkillisten rankkasateiden, tulvan tai jonkin jokiuoman tukoksen aiheuttama äkillinen vedenpinnan nousu ylitti lopulta itäpuolen hiekkaisen jokipenkereen ja vedet pääsivät syöksymään nykyisen Pitkälän suuntaan. Kun veden päävirtaussuunta kääntyi itään, alkoi alkuperäisen jokiuoman virtaamat heiketä nopeasti. Hidastuvien virtausten seurauksena uoman pohjalle alkoi kasautua lietettä. Kerrostumista tapahtui pari sataa vuotta, jonka jälkeen uusi uoma oli syventynyt niin paljon, ettei vanhaan uomaan valunut vesiä edes tulvien aikana. Nykyinen Vantaanjoen pinta on laskenut jo viisi metriä Djupbäckin kynnyksen alapuolelle. Merkittävimmät kosket sijaitsevat joen alajuoksun varrella. Vantaan alueelle näistä sijoittuu Seutulankoski ja Vantaankoski, Vantaan ja Helsingin rajaosuudella edellä mainittu Pitkälän ja lisäksi Niskalankoski ja Ruutinkoski.

2.1.2 Keravanjoki

Keravanjoki kuuluu Vantaanjoen vesistöalueeseen ja on Vantaanjoen pisin sivuhaara. Keravanjoki alkaa Hyvinkään Ridasjärvestä ja yhtyy Vantaanjoen pääuomaan Helsingin ja Vantaan rajalla, noin kuusi kilometriä ennen merta. Pituutta Keravanjoella on 65 km, ja valuma-alueen koko on runsas 400 km².

Keravanjoen suurimmat sivuhaarat ovat Rekolanoja ja Ohkolanjoki. Yläosaltaan Keravanjoki virtaa metsäisten maiden halki ja joen rannat ovat paikoin jyrkkäreitteisiä. Keski- ja alaosaltaan joki virtaa maalaismaisemissa taajamien välittömässä läheisyydessä.

syydessä. Merkittävimmät koskijaksot alajuoksun varrella ovat Matarinkoski, Pikku-koski sekä pohjapadolla varustettu Myllykoski. Korkein patorakenne sijaitsee Tikkurilankoskessa. Tikkurilankoskessa putouskorkeutta on kaikkiaan 5 m. /7/.

2.1.3 Rekolanoja

Vantaanjoen vesistöalueeseen kuuluva Rekolanoja on Keravanjoen pisin sivuhaara. Rekolanoja sijaitsee Vantaan kaupungin, Keravan kaupungin ja Tuusulan kunnan alueella ja sen valuma-alueen pinta-ala on 37,7 km². Rekolanoja saa alkunsa Firan lähteiltä Tuusulan suoalueilta. Rekolanoja käsitteenä ei ole yksiselitteinen, sillä joen uomaa nimitetään usealla eri nimellä sen matkalla kohti Keravanjokea. Pohjoisessa päähaaraan nimi on ensin Sammaloja, sitten Myrtinoja joka muuttuu Keravan puolella Nissinojaksi, Nissinoja kulkee lähellä junarataa vaihtaen nimensä lopulta Savionojaksi ja edelleen Korsonojaksi saapuessaan Vantaan puolelle.



Kuva 2.4. *Rekolanojan uomaa Vallinojan kohdalla.*

Vallinojan kohdalla Rekolanojaan laskee sijaintinsa mukaan nimen saanut Vallinoja. Rekolassa nimi vaihtuu edelleen Rekolanojaksi, jonka nimisenä joki lopulta laskee Keravanjokeen./18/

Vaikka Rekolanoja muistuttaa Vantaajoen ja Keravan joen rinnalla lähinnä kaupunkipuroa, on se paikallisesti tärkeä vesistö. Keskellä tiivistä asutusta kulkevalla vesistöllä on merkittävä rooli alueen luonnolle ja ihmisille. Edelleen tiivistyvä kaupunkirakenne asettaa haasteita olemassa olevan vesistön säilyttämiselle ja suojelemiselle. Sen

lisäksi, että vesistö toimii pohjana omalle ainutlaatuiselle ekologialle, on sillä myös merkittävä rooli alueen pintavesien purkureittinä. /18/

2.2 Savipohjaisten jokilaaksojen sortumamekanismit

Tarkasteltaessa jokien ja ympäröivän jokilaakson ominaisuuksia tulee huomioida jokien muuttuvat olosuhteet. Jokaisella virtaavalla vedellä on oma historiansa ja siten oma erityinen dynaaminen ja biologinen kehityksensä. Virtaama, joen uoma, sedimentin kulkeutuminen ja biologia ovat aikojen kuluessa muodostaneet yhteyden toisiinsa. Joen eliöyhteisö on biologinen vastapaino joen virtaamalle, rakenteelliselle monimuotoisuudelle ja kuormitukselle./4/

Virtaamalla ja jokiuoman muodoilla on suora vaikutus toisiinsa. Virtaavan veden voima muodostaa ja muuttaa jokiuomaa lajitellen ja pienentäen jokiuoman hiukkasia. Virtaava vesi aikaansaa eroosiota, sedimentin kulkeutumista ja kasautumista. Toisaalta pohjamateriaalin koko, muoto ja karkeus vaikuttavat virtaaman virtausvastukseen.

Valuma-alueen muodot ja prosessit muuttuvat ajan myötä. Täysin kehittynyt jokisysteemi on sopeuttanut geometriansa pitkän ajan kuluessa vallitseviin olosuhteisiin. Näin se pystyy johtamaan valuma-alueellaan tuotettujen vesien lisäksi myös verkon tuottaman kiinteän kuorman. Tällöin joki on saavuttanut keskimääräisesti pysyvän tilanteen. Luonnollinen jokisysteemi on myös sopeutunut kestäämään häiriöitä tiettyyn rajaan asti, esim. ääreviä vedenkorkeuden ja virtausnopeuden muutoksia. Häiriön tapahduttua joki palautuu kutakuinkin alkuperäiseen tilaansa. Joki systeemin tasapainotila tarkoittaa siis toisaalta systeemin kykyä kestää erilaisia tiloja./4/

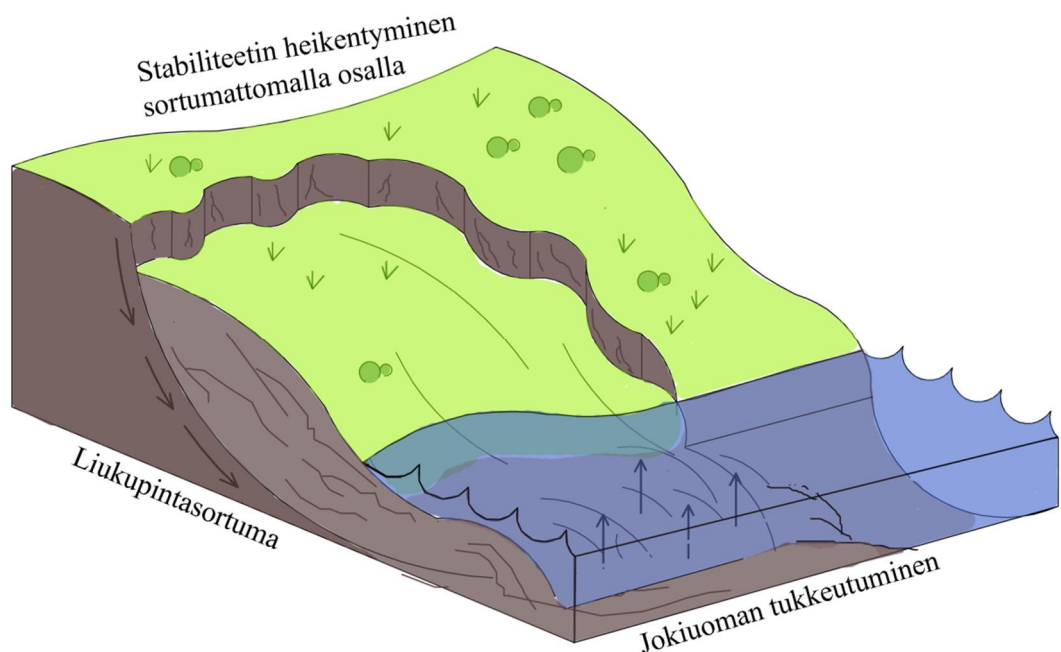
Idealisoitu tilanne tarkoittaisi, että tasapainotilanteissa joen valuma-alueelta tuleva sedimenttikuorma olisi sama kuin joen kuljetuskapasiteetti. Näin ei kuitenkaan luonnossa ole vaan tasapainotila saavutetaan ainoastaan pitkäaikaisessa tilanteessa keskimääräisinä arvoina. Tulvatilanteessa materiaalia lähtee liikkeelle ja tulvan tasoittuessa sedimentti laskeutuu kasautuen pohjaan. Tasapainotila ei tarkoita myöskään uoman pysymistä paikoillaan. Joelle on luontaista dynamiikkaa, että uoma liikkuu sivusuunnassa ja tulvan tullessa vesi nousee sen reuna-alueille. Mikäli valuma-alueen toimintoja ohjaavat ulkopuoliset tekijät muuttuvat kyllin nopeasti ja voimakkaasti valuma-alue ei ehdi sopeutua niihin. Tämä johtaa äkillisiin muutoksiin jokiuomassa. Häiriön tapahduttua joki pyrkii saavuttamaan tasapainon sopeutumalla uusiin olosuhteisiin. Sopeuttamisprosessit voivat olla paikallisia tai koko vesistön laajuisia. Systeemin epästabiilius näkyy uomassa muutoksina mm. sedimentin kerrostumisessa, kulumisessa tai uoman muodossa./4/

Maailmalla tehdään paljon tutkimusta morfologisten (muoto-oppi) muotojen ja sedimentin kulkeutumisen vuorovaikutuksesta. Esimerkiksi Alankomaissa tehdyissä tutkimuksissa on havaittu, että hiekkamailla uoman leveyden ja syvyyden suhde on hyvä indikaattori sen morfologiselle aktiivisuudelle. Mitä suurempi tämä suhde on sitä korkeampia särkkiä muodostuu. On kuitenkin huomattava, että Suomen olosuhteet, ko-

heesiomaat ja jokien loivuus, aiheuttavat virtaustehon ja morfologisten muutosten heikon korrelaation. Näin ollen ulkomaisesta kirjallisuudesta saatuja, stabiilin uoman aikaansaavia kaltevuuden, linjauksen, poikkileikkauksen leveys-syvyysuhteen ym. parametrien suhteita ei pidä soveltaa Suomessa. Erityisesti tämä pätee Etelä- ja Länsi-Suomen savialueilla./4/

Stabiliteetin ja sortumien kannalta merkittävä tekijä on jokien eroosio. Eroosio voidaan jakaa hitaasti ja nopeasti tapahtuvaan eroosioon. Virtaava vesi irrottaa maasta hiukkasia, joiden koko vaihtelee pienistä savihiukkasista karkeaan hiekkaan ja soraan riippuen mm. virtauksen nopeudesta ja kasvillisuuden aiheuttamasta hiukkasten sitoutumisesta maahan. Maan kyky vastustaa eroosiota aiheuttavia voimia, eli maan eroosioherkkyys riippuu maa-aineksen raakoosta, kerrostuneisuudesta, läpäisevyydestä, kosteudesta, tekstuurista, mekaanisesta koostumuksesta, kasvipeitteen lajista ja kattavuudesta, virtaamavaihteluista, tarkastellaanko mutkan sisä- vai ulkoreunaa sekä maanpinnan kaltevuudesta. Merkittävin hitaasti tapahtuvan eroosion herkkyyteen vaikuttavista tekijöistä virtaaman lisäksi on jokiuoman maapartikkelien raekoko. Vanhan maalajiluokituksen mukaan maalajit luokitellaan usein kitka- ja koheesiomaalajeihin. Koheesiomaalajeihin luetaan usein savi- ja silttimaat. Koheesiomailla eroosiovastus riippuu enemmän partikkelin välisten koheesiosidosten voimakkuudesta kuin itse partikkelien ominaisuuksista./4/ Vantaan joet kulkevat pääsääntöisesti paksuilla savikoilla, jolloin jokipenkereet ovat tyypillisesti erittäin savipitoisia./4/

Nopeasti tapahtuvaksi eroosioksi voidaan laskea jokien rannoilla tapahtuvat sortumat ja vyörymät. Hienorakeisessa maassa voi tapahtua jokitörmän sortuma, kun joen virtaus kuluttaa uomaa toispuoleisesti. Tällöin rantatörmä vähitellen jyrkkenee ja lopuksi sortuu joko yhtä tai useaa peräkkäistä taso- tai ympyräliukupintaa pitkin.



Kuva 2.5. Liukupintasortuma pengertuiskassa.

Vedenpinnan tason aleneminen ja alueella ilmeneva paineellinen pohjavesi kasvattavat sortumariskiä. Vesi toimii sortuvalle maalle vastapainona liukupinnan toisessa päässä. Sortumat tapahtuvat tyypillisesti runsasvetisen kevään tai sateiden jälkeen, kun vesi laskee joessa nopeasti ja toisaalta maamassaan sitoutunut vesimäärä on suurimmillaan/4/

Sortumat tapahtuvat pääsääntöisesti kahdella tavalla: /4/

1. Jyrkkä ranta lohkeaa tai valuu jokeen, jolloin ranta loivenee
2. Ranta-alue painuu alaspäin ja osa joen pohjaa nousee samanaikaisesti ylös. Tätä kutsutaan liukupinnaksi.

Savisilla jokipenkereillä stabiliteettiin vaikuttaa voimakkaasti vedenpinnan korkeus sekä uoman että pohjaveden osalta. Rankkasateiden aiheuttamat vedenpinnan nousut toisaalta kasvattavat jokiuoman vedenpinnankorkeutta, kasvattaen varmuutta jokipenkeeseen sortumiselle jokiuomaan. Toisaalta maan vesipitoisuuden kasvu pohjavedenpinnan yläpuolella lisää maan painoa ja nostaa maassa vallitsevia huokosvedenpainetta. Eli sortuman kannalta vaarallisin tilanne saavutetaan kun pohjavesi penkereellä on korkeimmillaan ja jokiuomassa matalimmillaan. Lihavilla savikoilla koheesion ja kapillari-ilmiön vaikutus kiinnevoimana ei ole yhtä merkittävä kuin silttimailla, mutta myös savilla nämä voimat vaikuttavat maan lujuuteen. Huokospaineen kasvu alentaa myös savimaiden lujuusominaisuuksia ja altistaa penkereitä sortumille.

2.3 Vantaanjokilaakson ominaispiirteitä

2.3.1 Tulvaherkkyys

Vantaanjoen valuma-alue on varsin tulvaherkkää. Alueella on vain vähän virtaamia ta-soittavia järviä ja vähäisetkin järvet sijaitsevat joen ja jokihaarojen alkupäässä. Runsaiden sateiden ja lumen sulamisvesien seurauksena jokiuomien vedenpinnat voivat nousta hyvinkin nopeasti.

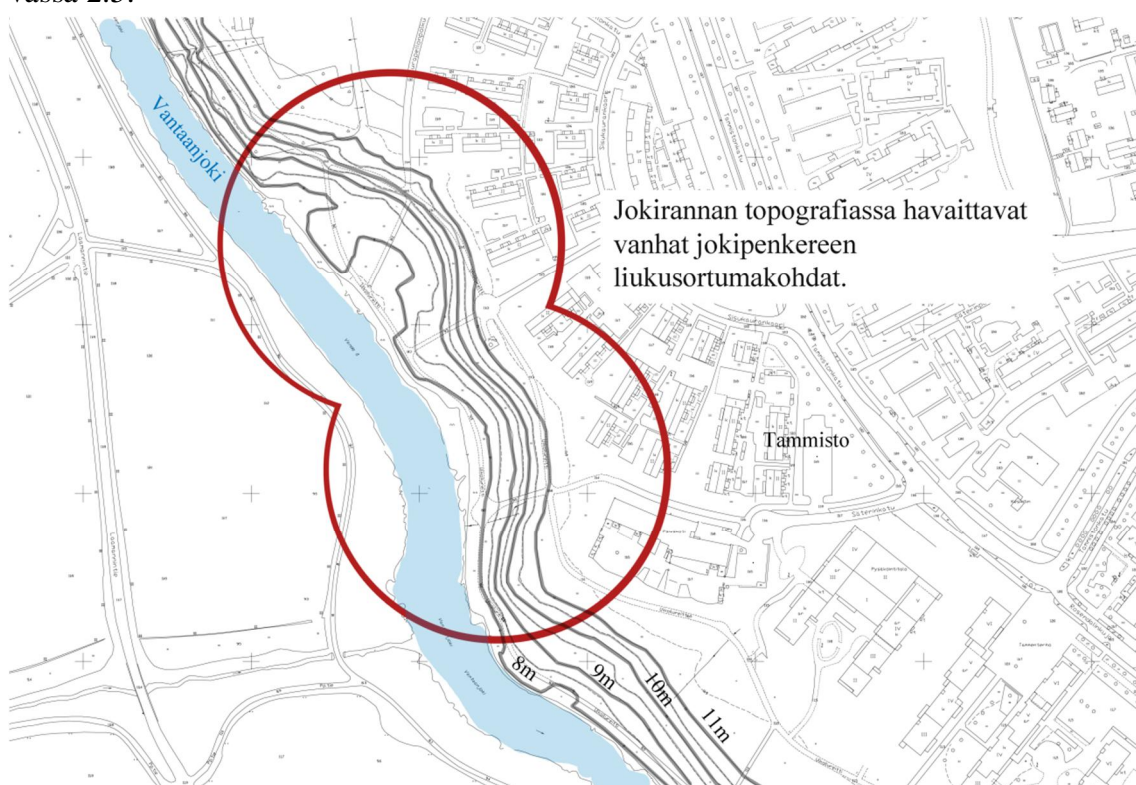
Kevättulva muodostuu lumen sulaessa. Nopeasti lämpenevä sää aiheuttaa lumen nopean sulamisen ja vapauttaa suuria vesimassoja. Samanaikaiset sateet pahentavat tilannetta entisestään. Viimeisin suurtulva Vantaanjoella on koettu keväällä 1966 runsaslumisen talven seurauksena. Tuolloin Vantaanjoen virtaama oli suurimmillaan Oulunkylän kohdalla, missä mitattiin suurimmillaan $317 \text{ m}^3/\text{s}$ ja Hanalassa $63 \text{ m}^3/\text{s}$ virtaama./5/ Oulunkylässä mitattu keskivirtaama on $16,0 \text{ m}^3/\text{s}$ (1937-2006) ja Hanalassa $2,9 \text{ m}^3/\text{s}$ (1966-2006) /25/.

Kesällä uomien vedenotto-kyky on runsaan kasvillisuuden takia heikompi ja vedenpinta nousee korkeammalle kuin vastaavalla virtaamalla keväällä. Vuonna 2004, heinäkuun ja elokuun vaihteessa Vantaanjoen vesipinta oli 2-3 metriä korkeammalla kuin kesällä yleensä. Tuolloinkin Vantaanjoen virtaama oli suurimmillaan Oulunkylän kohdalla, missä mitattiin suurimmillaan $175 \text{ m}^3/\text{s}$ virtaama, mikä vastaa tilastollisesti kerran seitsemässä vuodessa sattuvaa virtaamahuippua. Tämä ei siis ollut poikkeukselli-

sen suuri virtaama verrattuna kevättulviin, mutta kesäajan virtaamiin verrattuna se oli kuitenkin merkittävä. Samaan aikaan Keravanjoella mitattiin huippuvirtaamaksi 48 m³/s, mikä vastaa kerran 25 vuodessa toistuvaa virtaamaa. Tulvan seurauksena koettiin muun muassa Pirttirannan alueella joen tulvimisesta aiheutuvia haittoja. Tähän asti tulvariski on estänyt alueen liittymistä kunnalliseen vesihuoltoverkostoon. Tulvien aiheuttamat haitat alueiden virkistyskäytölle ja viljelylle ovat kesällä selkeästi suuremmat kuin keväällä. Rankkasateista aiheuttamat tulvat myös nousevat nopeasti minkä vuoksi niiden ennustaminen on hankalaa. /5/

2.3.2 Sortumat

Jokilaaksojen riittämätön vakavuus ilmenee jokipenkereen sortumina. Vaikka rakentaminen epästabiililla alueella aiheuttaa sortumariskin, tapahtuu sortumia myös luonnostaan. Paksulla savikolla kulkevien tulvaherkkien jokien sortumat ovat täysin luonnollisia. Sortumia on tapahtunut sekä Vantaan- että Keravanjoen jokitörmällä aina jokien syntyhetkistä asti. Tapahtuneita sortumia voidaan löytää alueen topografiaa tarkkailemalla. Syntyneet liukupintasortumat voidaan havaita jokivarren korkeuskäyriä tarkkailemalla, esimerkki korkeuskäyrien avulla havaittavasta sortumakohdasta on esitetty kuvassa 2.5.



Kuva 2.6. Alueen topografiassa erottuva liukusortumakohta Tammiston alueella.

Vantaanjoki voidaankin jakaa geologisen historian kannalta kahteen osaan. Kaivokselan pohjoispuoleinen osa on vanhaa, alkuperäistä Vantaanjoen uomaa ja Kaivokselasta itään päin kääntyvä jokiuoma verrattain nuorta ja nopeasti muodostunutta uomaa. Uuden uoman muodostuminen on ollut todella nopeaa ja voimakasta. Valtavat vesimassat ovat

nopeasti muodostaneet itselleen uuden kulkureitin ja vieneet maamassoja mukanaan raivaten uuden kulkureitin merelle. Tämän vuoksi Kaivokselan jälkeinen Vantaanjoen uoma on ollut verrattavissa kaivantoon, joiden kohdalla stabiliteetti voi heiketä vielä pitkiäkin aikoja itse kaivannon tekemisen jälkeen. Vantaanjoessa onkin havaittavissa vielä näinä päivinä jokiuomassa ajansaatossa tapahtuneita sortumia.



Kuva 2.7. Silmin havaittavia luonnollisia sortumakohtia ja heikon stabiliteetin esiintymiä Vantaanjoessa.

Nähtävissä olevia sortumakohtia voidaan pitää merkkeinä epästabiilista jokitörmästä. Sortumakohdat erottuvat jokivarsilla korkeuskäyrien kaareutumina ja voivat olla hyvin paikallisia. Sortumakohtia hakemalla voidaan kartoittaa alueita, joissa stabiliteetti on ollut heikoimmillaan. Tapahtuneita sortumia voidaan havaita myös silmämääräisesti seuraamalla jokiuoman muotoja.

2.4 Alueen geotekniset ominaisuudet

2.4.1 Geotekniset muodostumat

Vantaan seudun kallioperä on iältään maapallon vanhimpia geologisia muodostumia. Kallion yläpuoliset maakerrokset ovat taas muodostumina maailman nuorimpiin luetta-
via: ne ovat syntyneet viimeisen jääkauden aikana tai sen jälkeen. Lajittuneiden, veteen kerrostuneiden maalajien muodostumia on geologian pohjalta tapana nimittää niiden syntymiskausien mukaan, jotka liittyvät Itämeren muinaisvaiheisiin. Tärkeimmät Itämeren vaiheet ja niiden ajankohta on esitetty taulukossa 2.1. /30/

Taulukko 2.1. Itämeren vaiheet, niiden ajoitus ja vedenkorkeus nykyisestä merenpinnasta. /30/

Kausi	Ajankohta	Veden korkeus nykyisestä vedenpinnasta (n.)
Baltian jäärvi	11000 - 10000 v. sitten	>100 - m
Yoldiameri	10000 - 8500 v. sitten	80 - 60 m
Ancylusjärvi	8500 - 7000 v. sitten	60 - 40 m
Litorinameri	7000 - 3500 v. sitten	40 - 20 m

Vedenkorkeuden vaihtelut johtuvat maankuoren kohoamisesta, joka Helsingin seudulla on noin 300...500 mm sadassa vuodessa, ja Itämeren purkautumissuhteiden vaihtelusta. Maalajien kerrostumista säätelevät seuraavat tekijät: veden suolaisuus, veden virtausnopeus, aallokon vaikutus ja veden sisältämän kiintoaineksen laatu ja määrä. Maa-aineksen sedimentoitumista meren pohjaan tapahtuu merkittävästi, kun veden syvyys on yli 50 metriä. Matalampaan veteen kerrostumista tapahtuu virtausten johdosta vähemmän. Edellisen perusteella on odotettavissa, ettei Litorina- sedimenttejä merkittävästi esiinny Vantaan seudulla +20 tason yläpuolella. Tämän perusteella taas Vantaan alueen savista valtaosa lienee Yoldiameren ja Baltian jäärven sedimenttejä. /30/

2.4.2 Muodostumien geotekniset ominaisuudet

Rakennusteknisessä mielessä maalajeja tutkittaessa keskitytään maaperän maalajin mekaanisiin ominaisuuksiin, joilla tarkoitetaan maalajin lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksia sekä hydraulisia ominaisuuksia. Mekaanisiin ominaisuuksiin vaikuttaa maalajin syntyhistorian lisäksi erityisesti sen kuormitushistoria. Koska syntyhistorian lisäksi kunkin alueen kuormitushistoria on hyvin vaihtelevaa, ovat maaperätutkimukset tehtävä vaikka materiaali pystyttäisiinkin tunnistamaan ja erottamaan. Vantaan alueella tehdyissä tutkimuksissa on määritetty tyypillinen maalaji ja humuspitoisuus eri kerrostumien saviille. Arviot on esitetty taulukossa 2.2. /30/

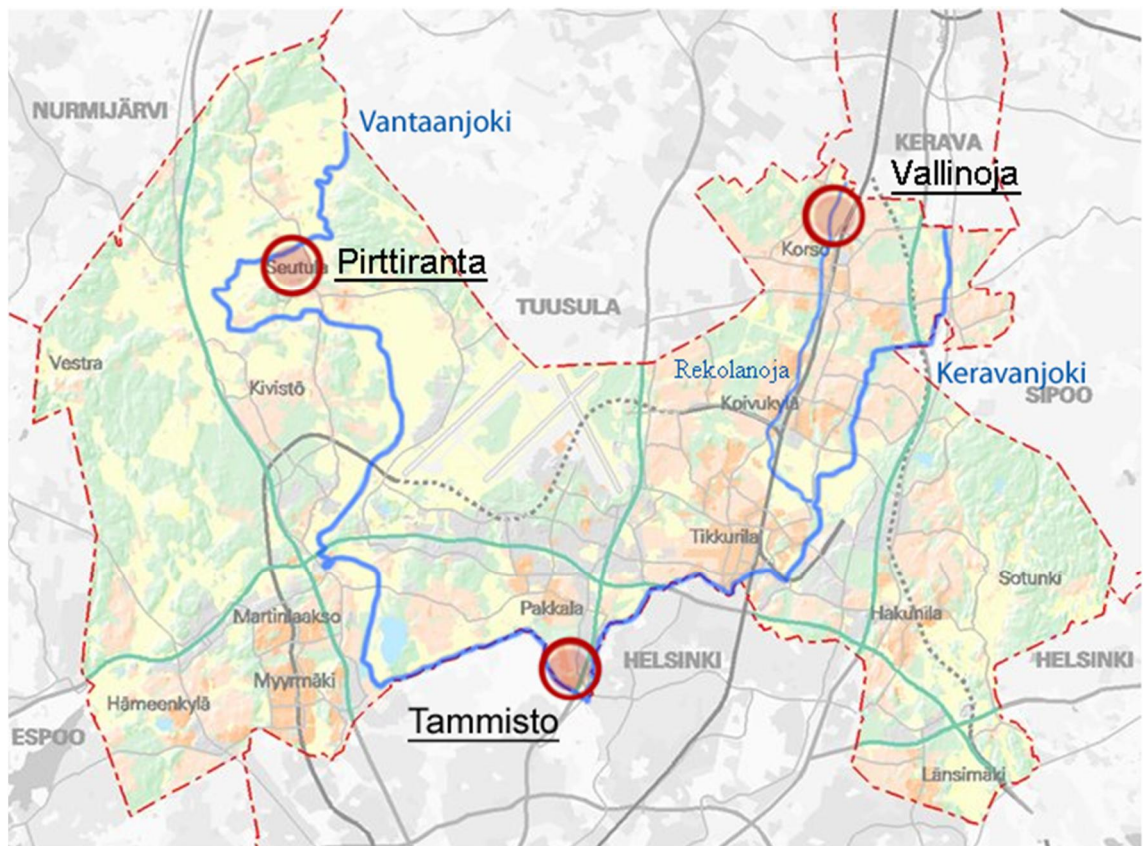
Taulukko 2.2. Eri-ikäisten savikerrostumien tyypillinen maalaji ja humuspitoisuus./30/

Kerrostuma	Maalaji	Humuspitoisuus, %
Litorinameri	liSa	> 1,5
Ancylusjärvi	laSa	< 1,5
Yoldiameri	liSa (Sa >60...70%)	< 1,5
Baltian jäärvi	liSa,laSa,Si (Hk)	< 1

Mekaaniset ominaisuudet, erityisesti lujuus- ja muodonmuutosominaisuudet ovat voimakkaasti jännityshistoriasta riippuvaisia, eikä niiden arvioiminen luotettavasti ilman pohjatutkimuksia ole mielekäästä. Epävarmuutta arviointiin tuo mm. seuraavat tekijät: Jokien lähiympäristössä maa-aines on ainakin osin kulkeutunutta, jokiuoman syntymekanismi vaihtelee, maa-aines on paikoin sekoittunutta ja pohjavedenpinnan vaihtelun seurauksena jännityshistorian vaihtelut ovat mahdollisia jo suppean tarkastelualueen sisällä.

3 TUTKITTAVAT ALUEET

Vantaalta on valittu kolme aluetta, joita työssä tarkastellaan. Alueet sijaitsevat eripuolella Vantaata ja näin edustavat mahdollisimman kattavasti Vantaan eri osia. Kohteiden sijainnit on esitetty kuvassa 3.1.



Kuva 3.1. Työssä tarkasteltavien kohteiden sijainti kartalla.

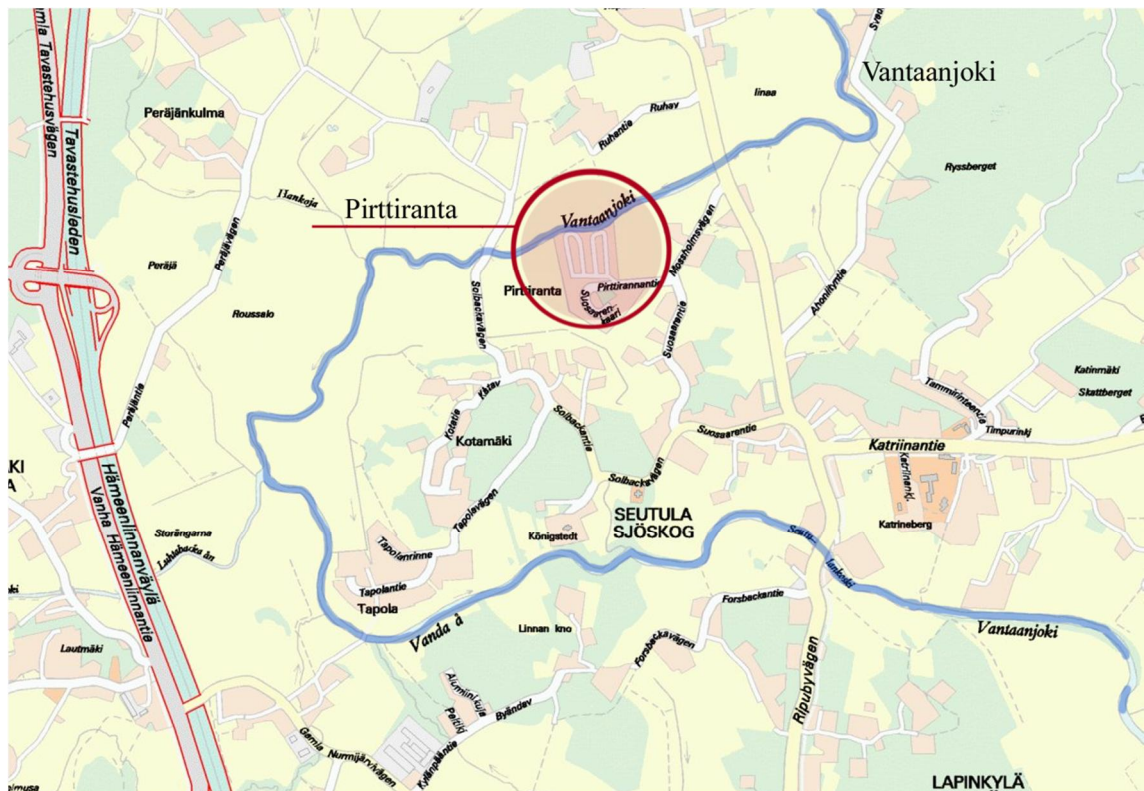
Tammistoa ja Pirttiranta ovat jo rakennettuja alueita ja niistä olemassa olevaa tutkimustietoa hyödynnetään mahdollisimman paljon. Vallinojan alueen rakentaminen on vasta suunnitteluasteella ja alueella tehdään pohjatutkimuksia työtä varten.

Vakavuustarkasteluiden tekemiselle on useita syitä. Pääsääntöisesti tarkasteluille ilmenee tarvetta, kun uusia kohteita suunnitellaan rakennettavaksi ennakolta epästabilleille alueille. Koska maapohjan vakavuusanalyysissä ollaan tekemisissä aina jossain määrin epähomogeenisen luonnonmateriaalin kanssa, tulee tilannetta aina tarkastella kriittisesti ja harkiten. Koska kaikki laskennalliset menetelmät sisältävät joitakin yksinkertaistuksia ja oletuksia, on analyttinen tarkastelu välttämätöntä. Tämän vuoksi on järkevää ja kannattavaa pyrkiä aina tarkempiin menetelmiin. Vaikka yhdyskuntarakenteen tiivistäminen on järkevää ja tehokasta, ei tarkempiin vakavuuslaskelmiin pyritä ainoastaan täydentävän rakentamisen mahdollistamiseksi. Tarkemmat laskelmat ja ana-

lyydit mahdollistavat ylimitoitettujen ratkaisujen käytön välttämisen myös harvempaan rakennetuilla alueilla. Ei myöskään ole tarpeenmukaista pyrkiä rakentamaan jokirantoja tukkoon, vaikka se vakavuusanalyysissä voitaisiinkin osoittaa mahdolliseksi. Nykyisten ranta-alueiden arvo virkistysalueina ja ulkoilumaastoina tulee pitää mielessä.

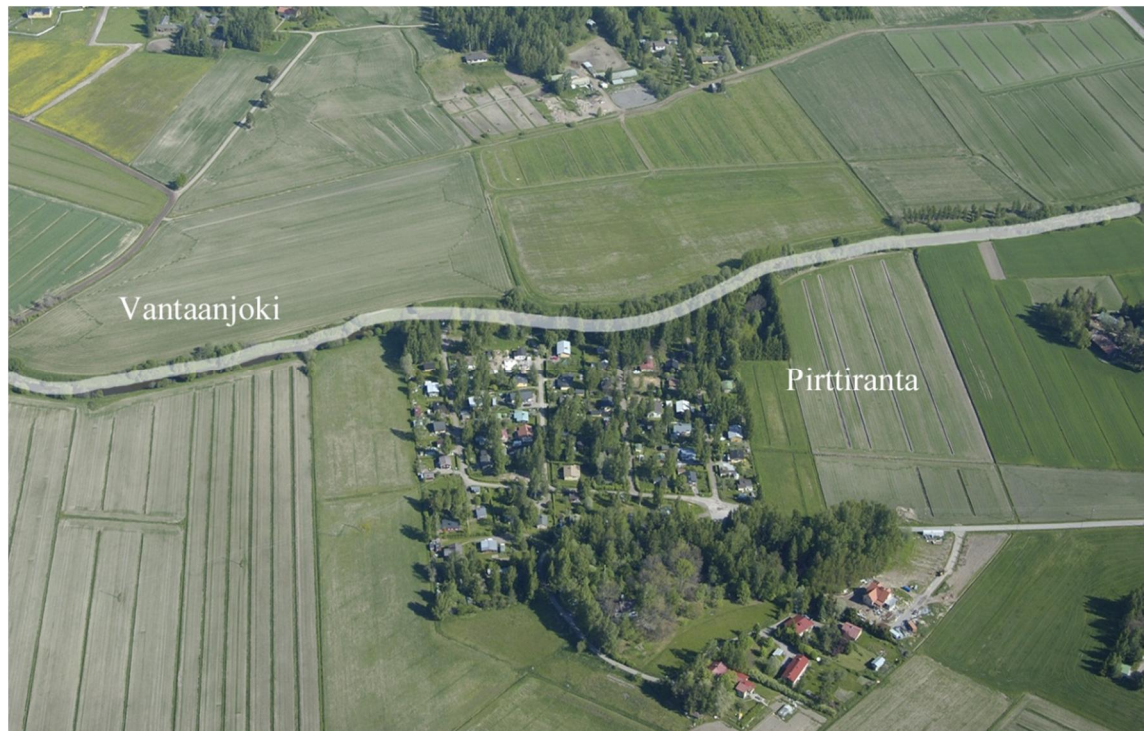
3.1 Pirttiranta

Pirttiranta on oma pieni kokonaisuus Seutulassa. Seutula on osa Kivistön suuralueella Luoteis-Vantaalla ja on osa valtakunnallisesti arvokasta Vantaanjokilaakson maisema-alueita, Seutulan kohdalla Vantaanjoki tekee suuren mutkan, kuten kuvasta 3.2. voidaan nähdä. /13/



Kuva 3.2. Pirttirannan sijainti kartalla

Seutula on säilyttänyt pääosin maaseutumaiset peruspiirteensä. Uudempaa asutusta Seutulan kylä sai 1950- ja 1960-luvuilla, jolloin pohjoiseen valmistui Pirttirannan loma-asuntoalue. Nopeasti alueesta muodostui lähinnä kesämökkialue ja alue onkin nykyisessä kaavassa merkitty loma-asuntoalueeksi. Alueet ovat kehittyneet pikkuhiljaa ja nykyisin Pirttirannassa on kesäasuntojen joukossa varsin uusiakin taloja ja alue on mitä kasvavassa määrin ympärivuotisessa asuinkäytössä. /14/



Kuva 3.3. Pirttirannan alue kuvattuna ilmasta vuonna 2011.

Vuonna 2004 koettu Vantaanjoen kesätulva koetteli tulvaherkkää Pirttirannan aluetta. Veden nousu jokitörmän yläpuolelle ja aiheutti veden pääsyn rakennusten perustuksiin ja pohjakerroksiin.



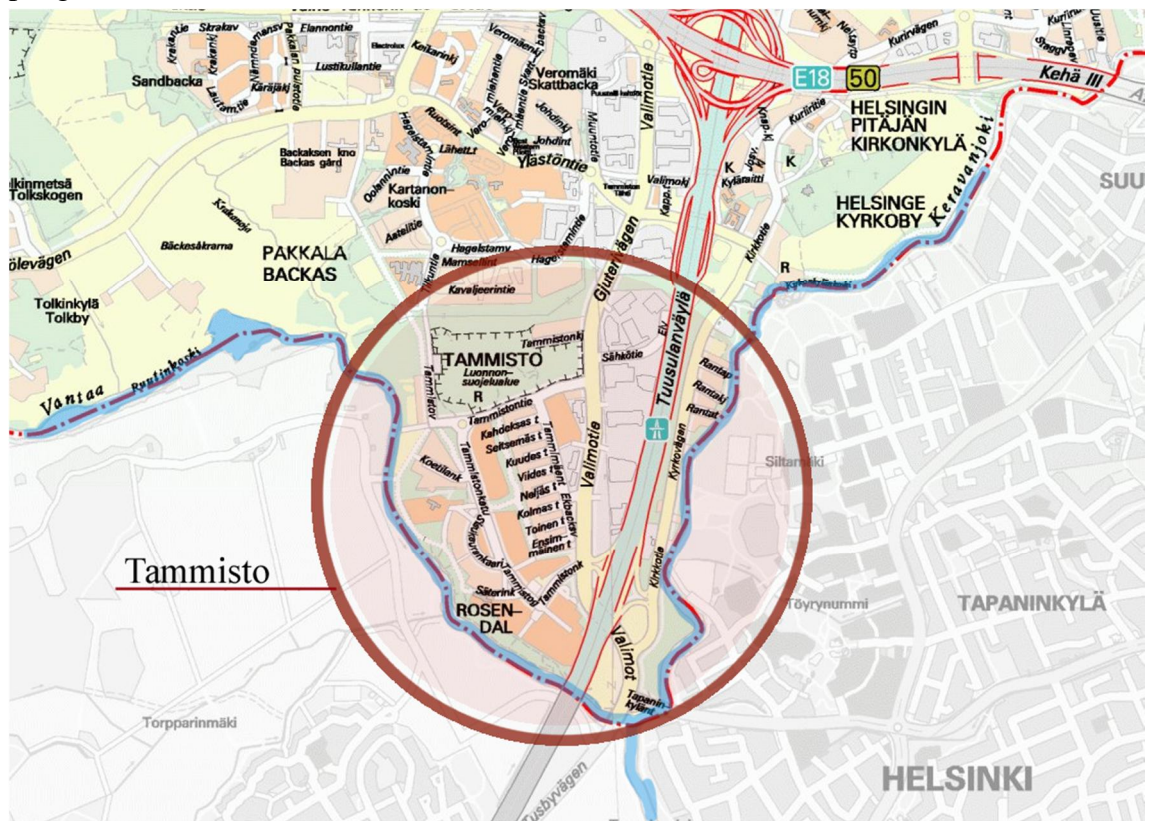
Kuva 3.4. Vantaanjoen jokiuomaa Pirttirannan kohdalla. Tulvariskin estämiseksi jokipengertä on korotettu n. 30 metrin etäisyydellä joesta.

Koska alue on kasvavassa määrin ympärivuotisessa käytössä, on alueella syntynyt tarve ja halu liittyä kunnalliseen vesihuoltoverkostoon. Tämä ei kuitenkaan ole ollut mahdollista niin kauan kun alue lasketaan tulvariskialueeksi. Tämän johdosta Pirttirannassa

onkin ryhdytty toimenpiteisiin jokipenkereen korottamiseksi ja tämän avulla tulvariskin pienentämiseksi. Jokitörmän stabiliteetti alueella on ollut tarkastelun alla tulvasuojeluhankkeeseen liittyvän tulvavallin suunnittelun yhteydessä.

3.2 Tammisto

Tammiston alue kuuluu Aviapoliksen suuralueeseen ja on sen eteläisin kaupunginosa. Tammiston rajanaapurina on idässä ja lännessä Helsinki. Kaupunginosaa reunustavat lännessä Vantaanjoki ja idässä Keravanjoki. Pohjoisessa alue rajoittuu Pakkalan kaupunginosaan./14/



Kuva 3.5. Tammiston alue kartalla.

Tammisto on piirteiltään tasaista Vantaan- ja Keravanjoen suistoaluetta. Etelässä joet kohtaavat ja jatkavat yhtenä jokena merta kohti. Vuosituhansien aikana merenpohjaan kertyneet savikot selittävät Tammiston tasaisuuden. Tammiston laajat savikot olivat pitkään viljelyskäytössä, kunnes uudet asuinalueet ovat vallanneet pellot. Ensimmäiset pienataloalueet rakentuivat pelloille 50- ja 60-luvulla. /14/

Tammimäentien omakotitaloalueen rakentumisen jälkeen Tammisto säilyi pitkään muuttumattoman, kunnes 2000-luvulla alue koki suuren muutoksen. Omakotitaloalueen ja Vantaanjoen väliselle pellolle alkoi nousta rivi- ja kerrostaloja. Uudella modernilla ja tiiviillä asuinalueella on yli 1000 asuntoa ja siitä on tullut haluttua asuinalueita. Ennen vuotta 2000 Tammiston asukasluku oli alle 300 mutta vuoden 2011 alussa väestöä oli jo hieman yli 3000. /14/



Kuva 3.6. Tammiston alue kuvattuna ilmasta vuonna 2011.

Nykyisen kaavan mukainen uusi asuinalue on lähes valmis, viimeisiä asuntoja rakennetaan eteläkärkeen Tuusulan-väylän länsipuolelle. Asuinalueeksi kaavoitetun alueen ja Vantaanjoen väliin jää tällä hetkellä n. 60...100m rakentamatonta virkistysaluetta, alue on kaavoitettu puistoalueeksi ja siellä kulkee ulkoilureittejä.



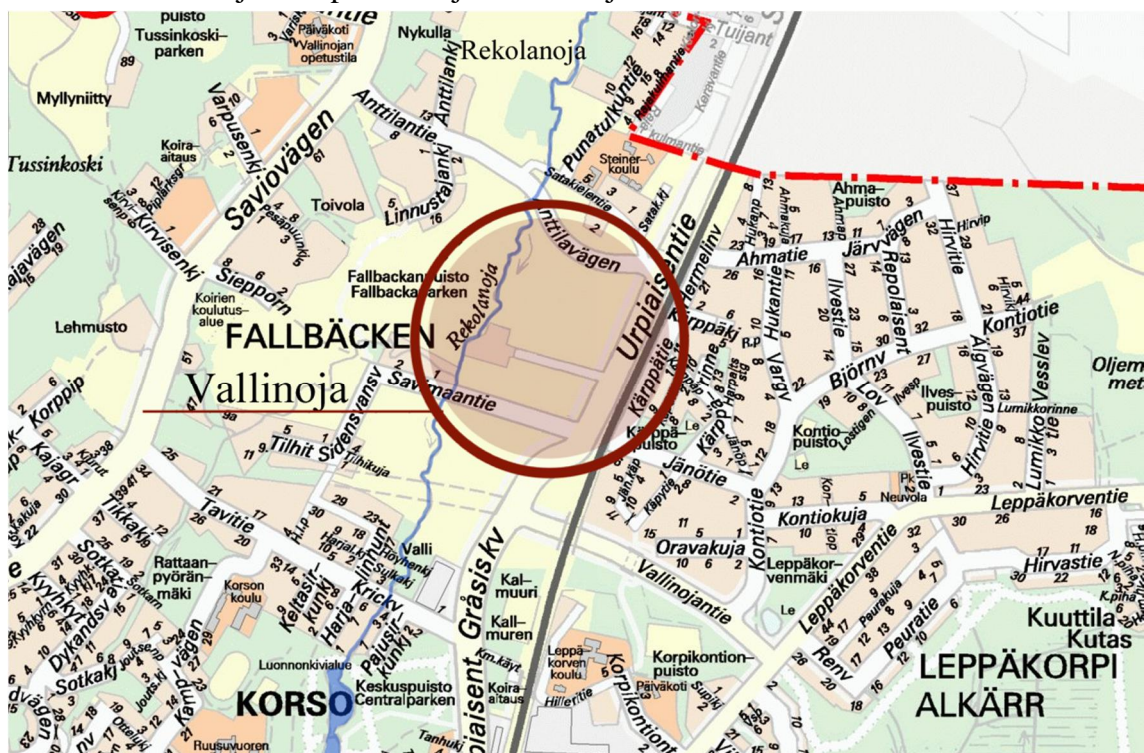
Kuva 3.7. Vantaanjoen uomaa Tammiston kohdalla.

60-100 metrin rakentamaton kaistale vastaa laskelmin saatua $F=1,8$ varmuusrajan sijaintia. Vuonna 2003 tehdyssä rakennettavuusselvityksessä korttelin 50036 (nykyisin 50037) on ilmoitettu alueen, jossa varmuus jokitorjän stabiliteetille on alle 1,8, ulottu-

van 92 metrin etäisyydelle joesta /11/. Laskelmat on tehty perustuen siipikairaustuloksiin ja niistä määritettyyn maan suljettuun leikkauslujuuteen. Tällä hetkellä alueella on joitakin vanhoja rakennuksia, jotka sijaitsevat alueella jonka varmuudeksi sortumista vastaan on määritetty alle 1,8. Työssä tullaan tarkastelemaan myös muilla menetelmillä etäisyyttä Vantaanjoesta, missä vaadittava $F=1,8$ varmuus saavutetaan.

3.3 Vallinoja

Vallinkylän kohde on tarkasteltavista alueista ainoa, jonka rakentaminen on vasta suunnitteluvaiheessa. Vallinoja on osa Korson suuraluetta ja sijaitsee Koillis-Vantaalla. Rajanaapureina pohjoisessa ovat sekä Tuusula että Kerava. Lännessä alue rajoittuu metsäkaistaleeseen, joka erottaa alueen Vierumäen alueesta. Idässä alue rajoittuu pääraataan. Suunnittelualue sijoittuu pääradan ja Rekolanojan väliin. /12/



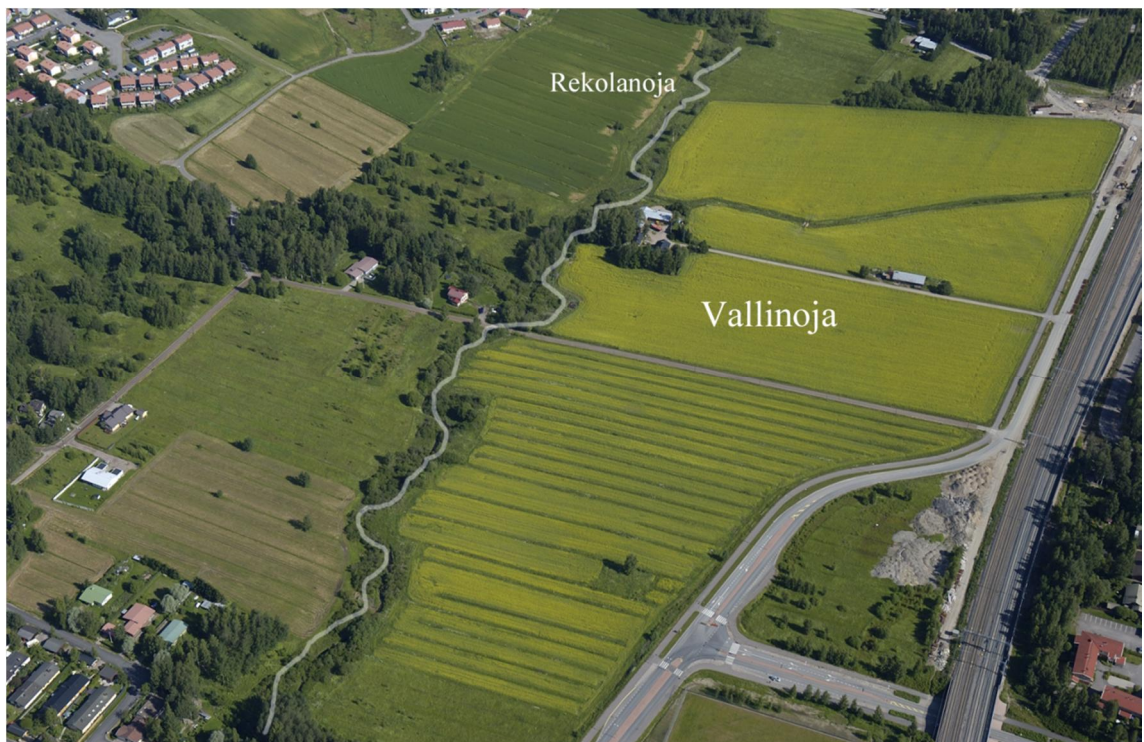
Kuva 3.8. Vallinojan sijoittuminen kartalla.

Vallinoja on asutettu alkaen Rekolanojan laaksosta, joka aikoinaan raivattiin viljelyksille. Laakson pohja on säilynyt alkuperäisessä käyttötarkoituksessaan vielä näihin päiviin, ollen edelleen viljelyskäytössä.



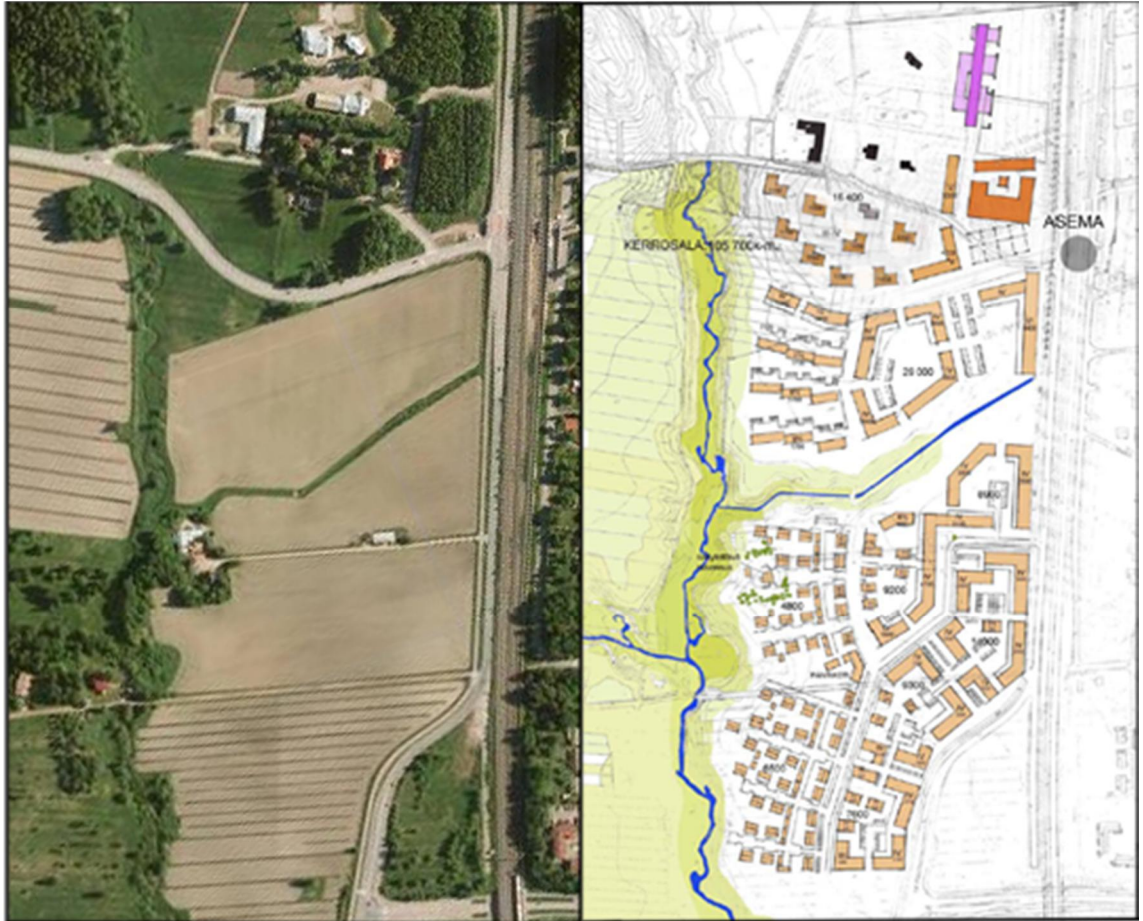
Kuva 3.9. Vallinojan peltomaat ovat edelleen viljelyskäytössä. Päärata kulkee kuvan oikeassa reunassa.

Osa alueen rakennuksista on peräisin viime vuosisadan alusta. Pääradan läheisyyttä alue ei ole pystynyt hyödyntämään oman junaseisakkeen puuttuessa, ja radanvarsi on näin ollen jäänyt asutuksesta vapaaksi. /12/



Kuva 3.10. Vallinkylän suunnittelualue ilmasta 2011. ©Vantaan kaupunki.

Alue on muuttoliikkeen myötä saanut entistä enemmän nuoria asukkaita, viimeisen 20 vuoden aikana alueen väestömäärä onkin nelinkertaistunut. Vantaalla ja Keravalla on yhteisiä tavoitteita alueen kehittymiselle./12,13/

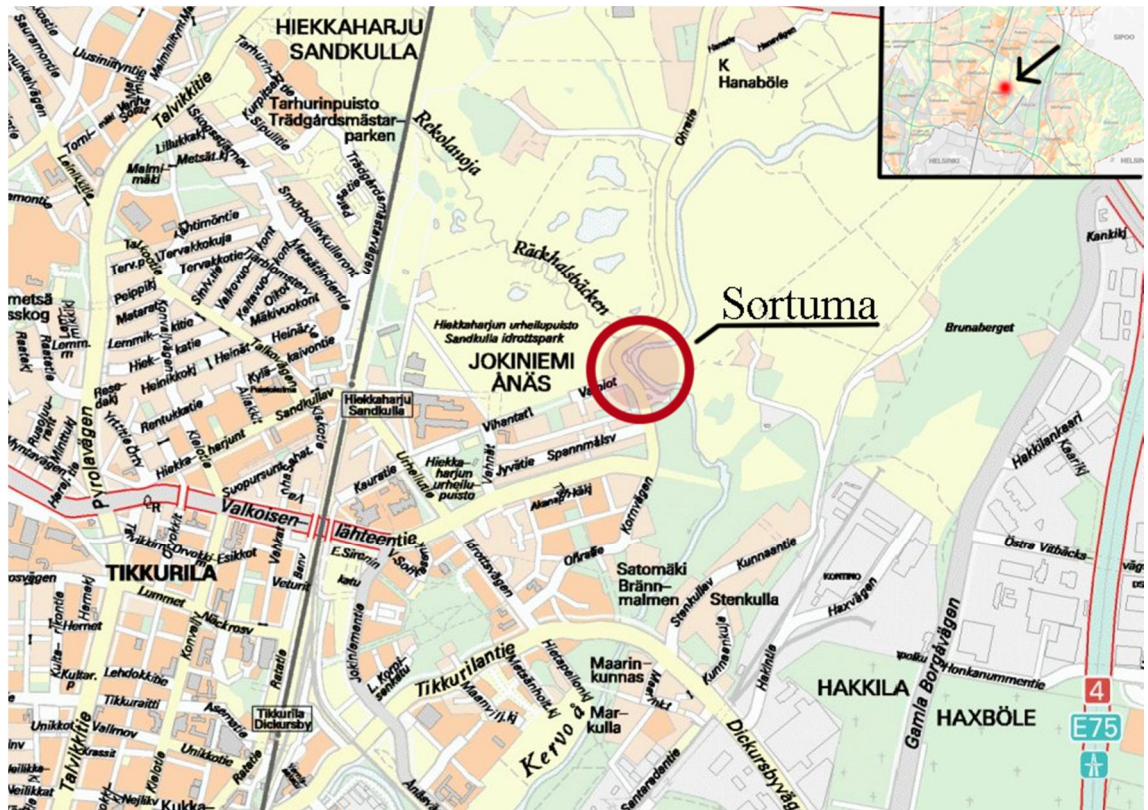


Kuva 3.11. Vallikylän suunnittelualue nykytilassa ja luonnos yhdestä alueen rakentamisvaihtoehdosta. (ilmakuva ©Vantaan kaupunki, suunnitelmaluonnos /12/)

Suunnitelmissa on rakentaa pääradalle puuttuva Vallinojan seisake ja sen läheisyyteen 10 000- 15 000 asukkaan asuinalue. Yleiskaava-alueuunnoksessa radan varsi on osoitettu tehokkaaksi asuinalueeksi, jolle saa rakentaa ensisijaisesti asuinkerrostaloja. Alueen pohjoisosaa ja puron vierus on osoitettu matalaksi ja tiiviiksi asuinalueeksi, jolle saa rakentaa ensisijaisesti pienkerrostaloja ja kytettyjä pientaloja. Suunnitelmia on jarruttanut pehmeäsavimaa, jolle rakentaminen on ollut vaikeaa./12,13/

3.4 Ohratie

Tämän työn tekemisen aikana Vantaan kaupungin alueella tapahtui kevyen liikenteen väylän sortuma Keravanjoen vieressä. Kesäkuun alkupuolella 2012 tapahtuneessa sortumassa joen suuntaisesti kulkeva väylä painui sortuman seurauksena noin 0,80...1,00 metriä alaspäin. Välttömästi kevyen liikenteen väylän vieressä kulkee myös ajoväylä.



Kuva 3.12. Ohratien sortuman sijainti



Kuva 3.13. Ohratien sortuman laajuus ja sijainti jokiluiskassa



Kuva 3.14. Sortuma kuvattuna kevyen liikenteen väylältä

Ohratien kohde on otettu mukaan työn sisältöön sillä sitä voidaan pitää hyvänä kohteena jokipenkereen stabiiliteetin tutkimisen kannalta. Koska kohteella on nyt tapahtunut todellinen sortuma ilman jatkuvaa kuormitusta, voidaan laskentatuloksille saada todellinen vertailukohta. Koska penger on juuri ja juuri pysynyt paikoillaan ennen sortumaan, voidaan sen varmuusluvuksi otaksua $F=1,0$. Tämä tieto mahdollistaa laskentatulosten todenmukaisuuden arvioinnin, sillä todellinen varmuustaso kutakuinkin tiedetään.

4 STABILITEETILASKENNAN TEORIA

4.1 Lamellimenetelmät

Suomessa eniten käytetty vakavuusanalyysissä laskentamenetelmä on rajatasapainomenetelmä (Limit Equilibrium Method). Rajatasapainomenetelmän periaate noudattaa seuraavaa:

- Menetelmässä sortuman otaksutaan tapahtuvan maan sisällä kulkevaa liukupintaa pitkin ja että maa on murtotilassa koko liukupinnalla.
- Otaksutaan, että liukupinnan sijainti ja muoto tiedetään. Tämän vuoksi tutkitaan useita erilaisia liukupintoja.
- Menetelmässä tutkittavalle liukupinnalle laitetaan tasapainon edellyttämä leikkausvastus ja verrataan tätä maan leikkauslujuuteen. Näiden suhteesta saadaan varmuuskerroin F .

$$F = \frac{s}{\tau} = \frac{\text{Maan leikkauslujuus}}{\text{Leikkausjännitys}} \quad (4.1)$$

- Todennäköisin liukupinta on tutkittavista liukupinnoista se, joka tuottaa laskelman pienimmän varmuuskertoimen. Vaadittu varmuuskerroin on kohteesta riippuen 1,5...1,8. /19/

Menetelmissä voidaan käyttää tehokkaiisiin jännityksiin perustuvaa c' - ϕ' -menetelmää, jossa otetaan huomioon liukupinnan eri osissa vaikuttava huokosvedenpaine u . Ellei tarkempia mittauksia ole tehty, tehdään laskelmat usein epäedullisinta pohjavedenkorkeutta käyttäen. Lisäksi voi syntyä huokosylipainetta, josta puhutaan kappaleessa 4.3. Laskelmat voidaan tehdä käyttäen maalle tehokkaita parametreja tai suljettua leikkauslujuutta. Tarkimpiin laskentaparametreihin päästään käyttämällä kolmiaksaalikokeilla määritettyjä ko. maakerroksen tehokkaita lujuusparametreja c' ja ϕ' . Tasapainoehtojen avulla lasketaan kunkin lamellin keskimääräinen leikkausjännitys (τ) ja tehokas normaalijännitys (σ_n) liukupinnan alapinnassa. Maan leikkauslujuus määritetään kaavalla 4.2.

$$s = c + \sigma_n \sin \phi \quad (4.2)$$

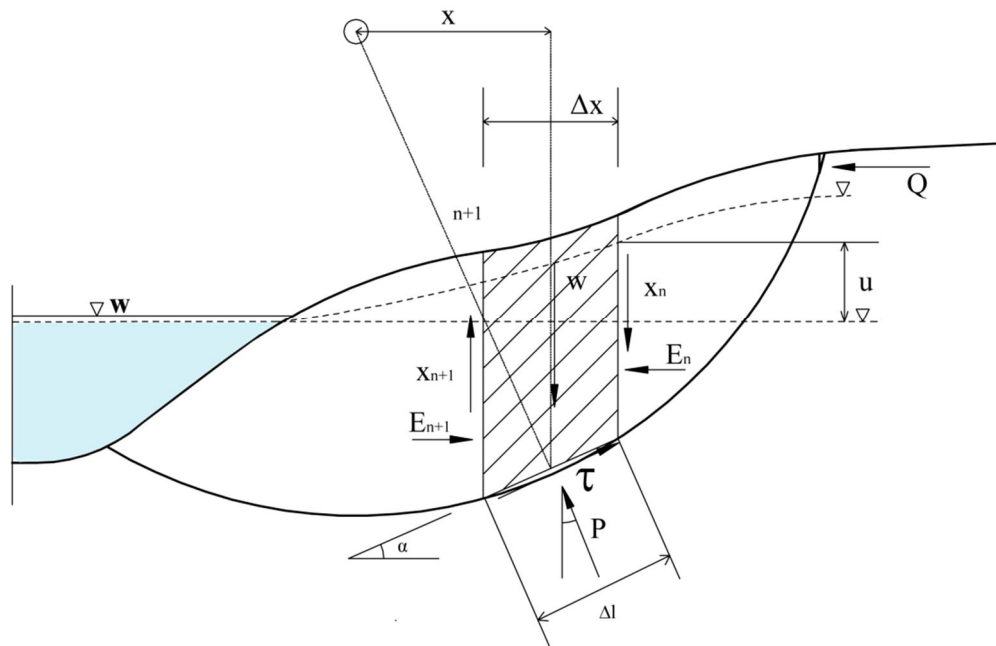
Yleisempää kuitenkin on, että laskelmat tehdään käyttäen suljettua leikkauslujuutta S_u . Tavallisesti suljettu leikkauslujuus määritetään pohjatutkimusten yhteydessä tehtävällä siipikairauksella.

Rajatasapainomenetelmässä on mahdollista tarkastella liukuvaa maamassaa yhdessä tai useammassa osassa. Suomessa yleisimmin käytetty menetelmä on lamellime-

netelmä. Lamellimenetelmässä tarkasteltava liukupinta jaetaan useampiin pystysuoriin lamelleihin. Liukupinnan laskennassa liukupinnan muoto voi olla periaatteessa mikä tahansa, mutta laskelmien tekemisen kannalta yksinkertaisinta on käyttää ympyränmuotoista liukupintaa. Ympyränmuotoisella liukupinnalla päästään usein suurempiin varmuuksiin, sillä liukupinnan pakottaminen ympyränmuotoiseksi ei välttämättä anna vastaukseksi vaarallisinta liukupintaa. Tämän vuoksi yksinkertaisilla menetelmillä voidaan aikaansaada suurempia varmuuksia kuin monimutkaisimmilla ja vapaita liukupinnanmuotoja käyttävillä menetelmillä. Lamellimenetelmät voidaan jakaa yksinkertaisiin ja tarkkoihin menetelmiin. Tässä työssä yksinkertaista menetelmää edustaa Bishopin menetelmä ja tarkempaa menetelmää Morgenstern-Price/GLE – menetelmä.

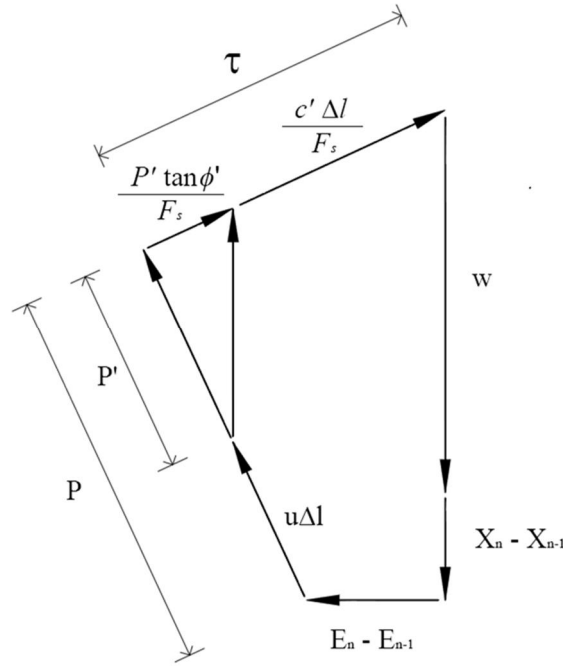
4.1.1 Bishopin menetelmä

Bishopin lamellimenetelmä on yksinkertaisimpia tapoja tutkia maaluiskan vakavuutta. Tämän vuoksi se sopii hyvin esim. alustaviin tarkasteluihin. Menetelmää voidaan käyttää, kun leikkautuvat maakerrokset ovat kutakuinkin tasalaatuiset. Tasalaatuksessa maassa ympyräliukupinnan muodostuminen on todennäköisintä.



Kuva 4.1. Luiskan varmuuden määrittäminen Bishopin mukaan $c' - \phi'$ – menetelmällä. /8/

Bishopin menetelmässä luiska jaetaan pystysuoriin lamelleihin ja projisoidaan kuhunkin lamelliin vaikuttavat voimat pystysuoralle suunnalle. Kun kunkin lamellin momenttisummat lasketaan liukuympyrän keskipisteen suhteen, saadaan määritettyä varmuuskerroin F .



Kuva 4.2. Luiskan varmuuden määrittäminen Bishopin mukaan. /8/

$$F_s = \frac{1}{\sum (\Delta W \sin \alpha)} \sum \left[\{c' \Delta x + (\Delta W - u \Delta x) \tan \phi'\} \frac{\sec \alpha}{1 + \frac{\tan \alpha \tan \phi}{F_s}} \right] \quad (4.3)$$

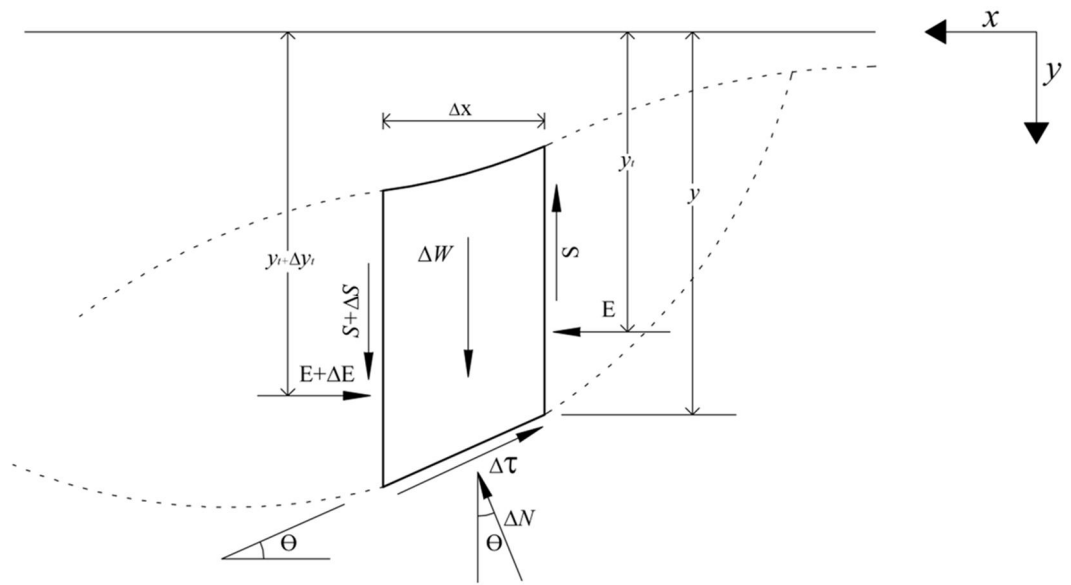
Lamellien väliset pystysuorat leikkausvoimat ($X_n - X_{n+1}$) voidaan jättää huomioimatta. Tällöin hieman aliarvioidaan todellista varmuutta mutta laskentatarkkuuden ei ole todettu kärsivän suuresti. Myös pintahalkeamiin muodostuneen veden aiheuttama paine Q voidaan ottaa huomioon laskelmissa, mutta sen merkitys lopputuloksiin on tavallisesti vähäinen ja se jätetään yleensä huomioimatta. /8/

Koska kaavassa varmuuskerroin F_s esiintyy kaksi kertaa, yhtälön molemmiin puoliin, on menetelmässä lopputulos ratkaistava iteroimalla. Iterointi tapahtuu sijoittamalla ensimmäisellä laskentakierroksella yhtälön oikealle puolelle oletuksena $F_s=1$. Tämän jälkeen ratkaisu F_s :n arvo sijoitetaan jälleen yhtälön oikealle puolelle ja jatketaan iterointia edelleen niin kauan kunnes peräkkäisten laskentakierrosten tuottama F_s arvo on sama.

4.1.2 Morgestern-Price/GLE

Morgestern-Price/GLE menetelmä poikkeaa Bishopin menetelmästä siten, että siinä huomioidaan momenttitasapainoehdon lisäksi vaakasuuntaisten voimien tasapainoehdot sekä lamellien väliset leikkausvoimat. Tällöin voimatasapainoehdot toteutuvat sekä lamellikohtaisesti että koko liukupinnalla. Tässä työssä Morgestern-Price- ja GLE (General Limit Equilibrium)-menetelmistä puhutaan yhdessä, sillä menetelmät ovat hyvin lähellä toisiaan. Menetelmien ero on lamellikohtaisen normaalivoiman resultantin mää-

rityksessä. Lopputulosten kannalta ei ole merkityksellistä kumpaa menetelmää käytetään. Tässä työssä laskelmat on tehty GLE- menetelmää käyttäen, sillä sen on todettu tuottavan vähemmän virhetilanteita laskennoissa. Menetelmien periaate on esitetty kuvassa 4.3.



Kuva 4.3. Luiskan varmuuden määrittäminen Morgenstern-Price/GLE menetelmällä./9/

Lamellin momenttipiste asetetaan menetelmässä lamellin keskelle, jolloin momentti-tasapaino keskipisteen suhteen asettuu nolaksi, samoin normaali- ja tangentiaalivoimat. Tällöin voimavektorit voidaan kirjoittaa seuraavaan muotoon:

$$S = y \frac{dE}{dx} - \frac{d}{dx}(E y_t) \quad (4.4)$$

$$\Delta N = (\Delta W + \Delta S) \cos \theta + \Delta E \sin \theta \quad (4.5)$$

$$\Delta T = (\Delta W + \Delta S) \sin \theta - \Delta E \cos \theta \quad (4.6)$$

Mohr-Coulumbin murtokriteeri on:

$$\Delta T = \frac{c \Delta x \sec \theta + \Delta N (\tan \phi)}{F} \quad (4.7)$$

Yhdistämällä yhtälöt 4.4, 4.5, 4.6, 4.7 ja kun tarkastellaan tilannetta, jossa x lähestyy nollaa ($x \rightarrow 0$) saadaan:

$$\frac{dE}{dx} \left(1 + \frac{\tan \phi}{F} \frac{dy}{dx} \right) + \frac{dS}{dx} \left(\frac{\tan \phi}{F} - \frac{dy}{dx} \right) = \frac{c}{F} \left[1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 \right] - \frac{dW}{dx} \left(\frac{\tan \phi}{F} - \frac{dy}{dx} \right) \quad (4.8)$$

Koska lauseissa kahden lauseen 4.7 ja 4.8 avulla pitäisi ratkaista kolme tuntematonta, E , S ja y_t , täytyy tehdä seuraavanlainen olettaus:

$$S = \lambda f(x)E \quad , \quad (4.9)$$

missä $f(x)$ on x funktio ja λ vakio. Tämän oletuksen jälkeen on valittava voimafunktion muoto jonka jälkeen kokonaisvarmuus F on ratkaistavissa yhtälöiden 4.8 ja 4.9 avulla muuntelemalla F :n ja λ :n arvoja. Geocalc-ohjelmassa voimafunktion $f(x)$ muodoksi on valittavissa neljä eri vaihtoehtoa /9/:

1. $f(x) = 1$
2. $f(x) = \sin(x)$
3. $f(x) = \text{trapetsoidi}$
4. $f(x) = \text{Fredlund-Wilson-Fan funktio}$

Tässä työssä tarkastelut on tehty käyttäen voimafunktiona $f(x) = \sin(x)$.

4.1.3 Huomioita käytössä olevista menetelmistä

Nykyisin yleisimmin käytetyissä menetelmissä on joitakin heikkouksia, jonka seurauksena menetelmiä käyttämällä päädytään joko yliarvioimaan tai aliarvioimaan todellista varmuutta. Suljettuun leikkauslujuuteen perustuvat laskelmat usein aliarvioivat todellista varmuutta. Tämä johtuu enemmän suljetun leikkauslujuuden määrittämisessä tapahtuvista virheistä kuin itse laskentamenetelmän puutteista. Yleinen toimintatapa on määrittää maan leikkauslujuus siipikairalla ja käyttää määritettyä redusoitua leikkauslujuutta sellaisenaan laskelmissa. Monesti päädytään tilanteeseen, jossa leikkauslujuus määritetään lähestulkoon vakioksi koko savikerroksessa, vaikka savikerroksen paksuus olisi useita tai useita kymmeniä metrejä. Lujuus oletetaan vakioksi myös vaakasuunnassa, välittämättä siitä, onko kuormitus vetoa vai puristusta. Lujuuden vakioarvo syvyydestä huolimatta ei edellä esitetyn kaavan 4.3 mukaan voi kuitenkaan olla mahdollista, sillä maan leikkauslujuus on verrannollinen vallitsevaan jännitystilasta. Jännitystilasta kasvaessa syvyyden funktiona, tulisi myös leikkauslujuuden kasvaa ainakin jossain määrin.

Kun maan leikkauslujuus määritetään tehokkailla parametreilla, voidaan päätyä yliarvioimaan todellista varmuutta. Tehokkailla c' - ϕ' - parametreilla laskettaessa tulisi huokospaine tuntea. Tämä on kuitenkin ongelmallista, koska huokosylipaine on riippuvainen materiaalin lisäksi ajasta ja vallitsevasta jännitystilasta; se muuttuu kuormituksen ja ajan funktiona./1/

Lamellimenetelmässä määritetään yksi varmuuskerroin, joka koskee koko liukupintaa. Tämä tarkoittaa oletusta, että murren tapahtuessa se tapahtuu liukupinnan jokaisessa pisteessä yhtä aikaa. Tämä johtaa edelleen yksinkertaistukseen jonka mukaan jännitys suhteessa lujuuteen olisi sama liukupinnan kaikissa osissa. Todellisuudessa, homogeenisesta maasta huolimatta, varmuus eri liukupinnan osissa vaihtelee, koska jänni-

tysten mobilisoituminen vaihtelee eri osissa liukupintaa. Lamellimenetelmät eivät myöskään huomioi pystysuuntaisten jännitysten jakautumista maahan. Vallitseva normaalijännitys lasketaan ainoastaan kohtisuoraan tarkastelupisteen yläpuolelta olevista kuormista. Luiskien kaltevassa geometriassa tämä aiheuttaa virhettä, sillä luiskan pinta-kerroksien päällä oleva maamassa ei ole paksu mutta todellisuudessa myös luiskan yläosan massat lisäävät jännityksiä.

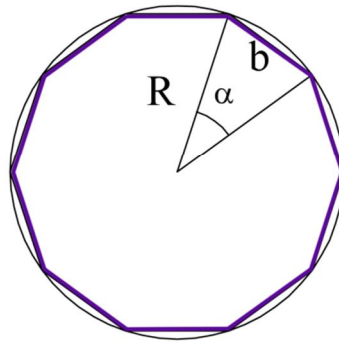
Lamellimenetelmissä yksi lähtöoletus on, että liukupinnan sijainti tiedetään. Tällöin lasketaan useamman erilaisten liukupinnan sijainti ja tämän jälkeen valitaan pienimmän varmuuden tuottanut liukupinta. Mitä enemmän erilaisia liukupintoja tutkitaan, sitä todennäköisemmin onnistutaan löytämään pienimmän mahdollisen varmuuden tuottama liukupinta. Myös menetelmissä käytetty iteroinnin lähtöoletus $F=1$ voi tuottaa ongelmia. Edellisen kierroksen lopputulokseen perustuva laskenta voi lähteä väärälle polulle heti alussa, eikä näin ollen todellista $F:n$ arvoa onnistuta löytämään ollenkaan. Ongelma esiintyy lähinnä vain käsin laskettaessa, sillä Geocalc- ohjelmassa käytetään monimutkaisempaa matriisilaskentaan perustuvaa "Double QR"-menetelmää. Geocalc- ohjelmassa ratkaisun löytäminen on hyvin todennäköistä. Suurinta epätarkkuutta laskelmiin tuo kuitenkin huokosvedenpaineen vaikea mallintaminen.

4.2 Elementtimenetelmä

4.2.1 Yleistä

Lamellimenetelmää kehittyneempi ja monimutkaisempi tapa tutkia maaluiskien vakavuutta on käyttää laskelmien tekemiseen elementtimenetelmää. Elementtimenetelmän perusidea on jakaa tutkittava ongelma pienempiin osiin ja tämän jälkeen ratkaista ongelmat osa kerrallaan, jonka jälkeen ratkaisut kootaan jälleen yhteen ja aikaansaadaan approksimaatio koko ongelmasta. Mitä pienempiin osiin ongelma jaetaan, sitä tarkempi approksimaatio ratkaisusta koko ongelmaan tuloksena saadaan. /24/

Ympyrän piiri monikulmion avulla



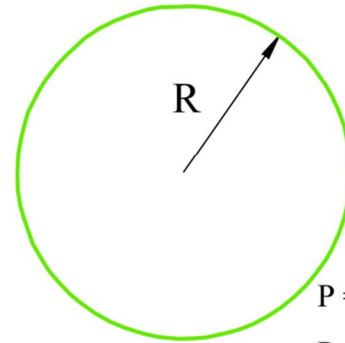
$$b = 2R \sin \frac{\alpha}{2}$$

$$\alpha = \frac{2\pi}{n}, \text{ n on monikulmion sivujen lukumäärä (10kpl)}$$

$$b = 2R \sin \frac{\pi}{n}$$

$$\Rightarrow P = \sum_{k=1}^n 2R \sin \frac{\pi}{n} = 2R \sin \frac{\pi}{n} \times n = 2R \sin \frac{\pi}{10} \times 10 \approx \underline{\underline{6,18R}}$$

Ympyrän piirin tarkka arvo



$$P = 2\pi R$$

$$\underline{\underline{P \approx 6,28R}}$$

Ero 1,5%

Kuva 4.4. Ympyrän piirin ratkaiseminen elementtimenetelmällä osissa ja tarkalla laskukaavalla.

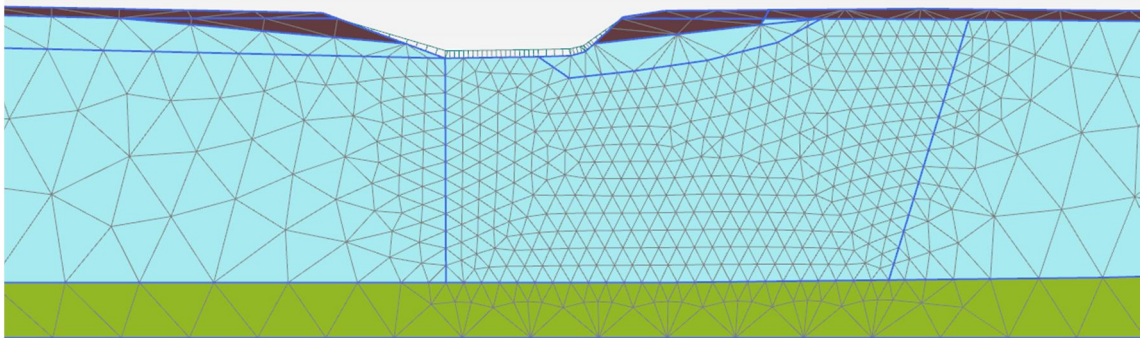
Esimerkkinä elementtimenetelmällä ratkaistavasta ongelmasta voidaan käyttää ympyrän piirin ratkaisemista. Kun ympyrän kehää jäljitellään monikulmiolla, voidaan piiriä approksimoida monikulmion sivujen summalla. Esimerkissä kehää on jäljitelty kymmen-sivuisella monikulmiolla, jolloin sivujen pituuden summaksi on saatu 6,18R. Tarkalla piirin laskukaavalla piirin tuloksesi on laskettu 6,28. Karkea approksimaatio antaa tuloksen, joka poikkeaa todellisesta tuloksesta 1,5%. Mikäli approksimaatio tehtäisiin esimerkiksi 50 sivuisella monikulmiolla, poikkeaa piiri todellisesta tuloksesta enää 0,015%. Mitä pienempiin osiin ongelma jaetaan, sitä tarkempi approksimaatio saadaan.

4.2.2 Plaxis-ohjelma

Tässä työssä elementtimenetelmään perustuvat vertailulaskelmat tehdään Plaxis-ohjelmalla. Plaxis-ohjelmassa annettu syötetään lähtötietoina ratkaistava ongelma eli geometria ja laskentaparametrit ja menetelmät joilla ongelma halutaan ratkaistavan. Menetelmässä ongelma jaetaan geometrian avulla elementteihin ja elementin sisäisiin sekä elementit yhdistäviin solmupisteisiin. Menetelmässä valitaan elementin muoto (Plaxis-ohjelmassa kolmio), sekä määritetään elementin vapaiden parametrien (vapausasteiden) määrä. Elementtimenetelmässä ei tutkita tiettyä liukupintaa vaan ratkaistaan joukko pisteitä ja analysoidaan tulosten perusteella mahdollista liukupinnan paikkaa. Olennaista on, kuinka tiheää eli tarkkaa elementtiverkkoa laskennoissa käytetään. Liian

harva elementtiverkko johtaa liian jäykkään malliin ja todellisuutta suurempiin varmuuksiin. Mitä tiheämpi verkko on, sitä tarkempi laskenta on. Tiheä verkko vaatii enemmän laskentakapasiteettia ja tarpeettomien laskentapisteidien laskenta vain kasvattaa laskenta-aikoja. Järkevää onkin tihentää laskentaverkkoa poikkileikkauksen alueilla, joissa muutosten odotetaan tapahtuvan. Suurin ero käytännön laskelmissa lamellimenetelmään on parametrien ja materiaalmallien valinnassa.

Kunkin maakerroksen kohdalla voidaan valita analyysimalli, jonka mukaan kyseistä maakerrosta laskelmissa tarkastellaan. Myös parametrien valinnassa tulee osata soveltaa perinteisin pohjatutkimuksin saatavia parametreja.



Kuva 4.5. Esimerkki yksinkertaisesta elementtiverkosta Plaxis-ohjelmassa.

Avoimen tilan tarkasteluissa käytettävällä materiaalmallilla ei ole suurta merkitystä sillä huokosylipaineen syntymistä ei tällöin tapahdu, sama koskee laskettaessa Su- arvolla. Tehokkailla parametreilla suljetun tilan laskelmissa käytettävällä materiaalmallilla on suuri merkitys. Hienorakeisissa maissa tapahtuvat muutokset huokospaineissa on mahdollista huomioida vain käyttäessä materiaalille sopivaa materiaalmallia. Tässä työssä vertailulaskelmat on tehty käyttäen saven osalta Soft Soil- materiaalmallia (myötölujittuva malli) ja tavallisista laboratoriotutkimuksista johdettuja laskentaparametreja. Soft Soil- materiaalmallia käyttäen on mahdollista huomioida saven myötäämisestä johtuva huokospaineen kasvu. Muiden maakerrosten kohdalla käytetään yksinkertaista Mohr-Coloumbin materiaalmallia (linearielastinen, ideaaliplastinen malli), jossa parametreina käytetään pohjatutkimuksista johdettuja laskentaparametreja.

Ohjelmassa laskelmat tehdään käyttäen eri laskentavaiheita. Määritettäessä varmuutta luiskan sortumista vastaan voidaan käyttää Safety- laskentavaihetta, jolloin ohjelma määrittää varmuuden murtumista vastaan numeroarvona. Safety- vaiheessa varmuuden määrittäminen tapahtuu kutienkin Mohr- Coulumb -materiaalmallia käyttäen, siten, että laskennassa lujuusparametreja pienennetään kunnes sortuminen tapahtuu. Tällöin huokospaineen kasvua ei huomioida oikein. Tämän vuoksi vertailulaskelmat on tehty myös manuaalisesti lujuusparametreja heikentämällä, ja vertailtu tuloksia Mohr Coulumb mallilla laskettuihin Safety- laskentavaiheella määritettyihin varmuuksiin. Manuaalisessa määrittäyksessä laskelmat tehdään Soft Soil- mallilla, jolloin huokospaineen kasvu voidaan huomioida laskelmissa. Menetelmä on esitetty tarkemmin lähteessä /23/.

Vertailulaskelmat tehdään Plaxis-ohjelmalla antamaan vertailupohjaa Geocalc-ohjelmalla laskettuihin lamellimenetelmiin perustuville tuloksille. Ohjelman käyttö vaatii syvällistä perehtymistä sen käyttömahdollisuuksiin, rajoituksiin, laskentaparametrien valintaan ja tulosten tulkintaan, eikä sitä suositella käytettäväksi alustavien tarkasteluiden tekemiseen.

4.3 Huokosvedenpaine

4.3.1 Huokosylipaineen muodostuminen

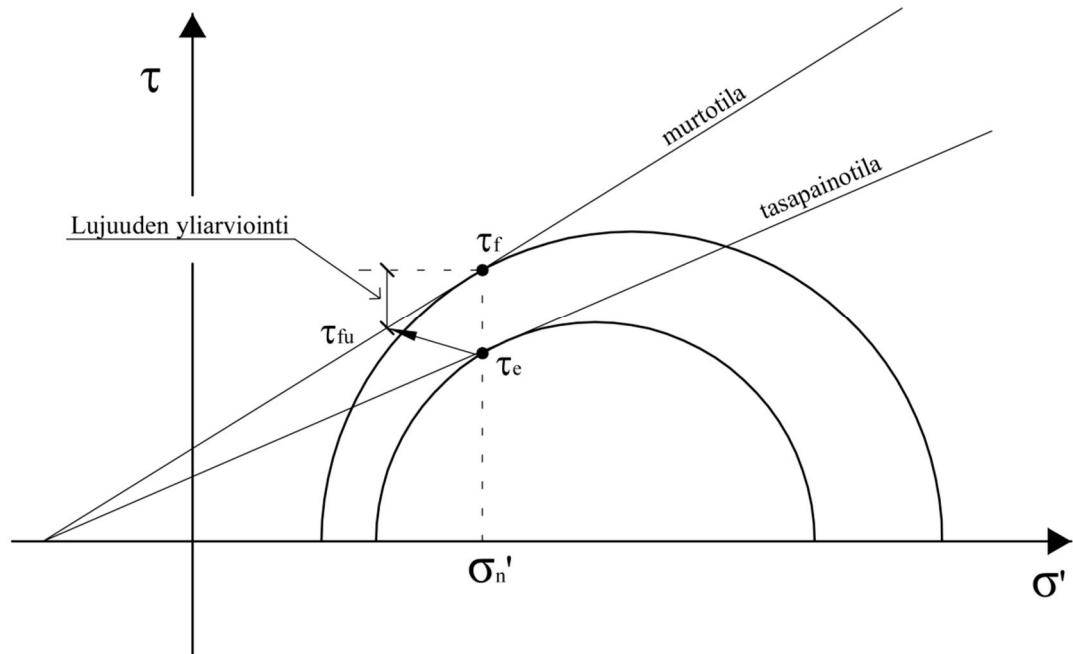
Luiskien stabiliteetti tulee kriittiseksi tavallisesti hienorakeisilla mailla. Hienorakeiset maat ovat tyypillisesti huonosti vettä läpäiseviä, jolloin veden liikkuminen maassa on hidasta. Luonnon tilassa savimaat ovat tavallisesti joko osittain tai kokonaan vedellä kyllästyneitä, riippuen pohjavedenpinnantasosta. Luonnontilassa huokosissa vallitsee huokospaine, joka on vallitsevan vedenpaineen suuruinen. Kuormitetussa tilanteessa maassa vallitsevat jännitykset puristava maapartikkeleita ja niiden huokostilavuutta kasaan pyrkien puristamaan huokosissa olevan veden pois. Maan tiiviistä rakenteesta johtuen maahuokosissa oleva vesi ei kuitenkaan pääse purkautumaan, vaan jännityslisäys jakaantuu osittain huokosvedenpaineeksi. Tätä kuormitetun tilanteen kasvanutta huokospainetta kutsutaan huokosylipaineeksi.

Huokospaineen suuruuteen vaikuttavat maakerrosten jännitykset, vedenläpäisevyys, kokoonpuristuvuus sekä reunaehdot. Vedenjohtavuudet voivat olla vaaka- ja pystysuuntaan erilaiset, useasti vaakasuuntainen vedenjohtavuus on suurempi. Myös kuormasta aiheutuva jännitysjauma johtaa pienempään kuormitukseen kuorman sivuilla jolloin huokospaineen purkautuminen on luonnollista pienemmän paineen suuntaan. Tästä johtuen huokospaine kasvaa myös kuormituspisteen sivuilla. Huokospaine voi nousta vielä pitkän ajan kuluttua kuorman lisäyksestä johtuen osittain kuormasta ja osittain saven käyttäytymisestä, eli myötäämisestä kuormituksen alaisena. Huokospaineella on suuri merkitys laskelmissa. Laskelmien on todettu olevan epävarmalla pohjalta, mikäli huokosvedenpainetta ei ole luotettavasti mitattu./1/

Tampereen teknillinen yliopisto on mukana tutkimuksissa, joissa huokospaineen käyttäytymistä pyritään mallintamaan laskemalla. Perniössä on toteutettu koepenkereen sorrutuskoe, jonka aikana muutoksia ympäröivässä maaperässä tutkittiin maahan sijoitettujen instrumenttien avulla. Kokeesta saatuja havaintoja on hyödynnetty professori Tim Länsivaaran tutkimuksessa, jossa on mallinnettu huokospaineen muodostumista laskennallisesti kitkakulmaan perustuen.

Tehokkailla parametreilla laskettaessa tulee huomioida huokospaineen vaikutus. Kuormitetuilla pehmoisilla savilla murtumista edeltää huokospaineen kasvu. Kuormituksen lisäksi huokospaineen kasvua aiheuttaa pohjavedenpinnan nousu. Virhe laskelmissa tehdään, kun käytetään ainoastaan suljetun tilan tehokkaita jännityksiä, yhtä tärkeää on laskea sekä alkuperäinen huokospaine että itse murtotilan aiheuttama huokos-

paineen kasvu. Jos huokospaineen vaikutus jätetään kokonaan huomioimatta, päädytään huomattavaan varmuuden yliarvioimiseen.



Kuva 4.6. Lujuuden yliarviointi suljetun tilan tarkasteluissa, tilanteissa joissa huokospainetta ei huomioida. /10/

Kun pehmyttä savea kuormitetaan murtotilaan, voi kuormituksesta aiheutuva huokospaineen lisäys olla itse kuormituslisäystä suurempi. Tällainen huokospaineen kasvu voi aiheuttaa murtumisen jälkikäteen ilman varsinaista kuormituslisäystä. Normaalkonsolidoituneella savella jännityslisäys ilmenee saven myötäämisinä. Mikäli savi on huonosti vettä läpäisevää, ei vesi pääse poistumaan huokosista. Tilavuus ei siis pääsekään pienenemään vaan huokosissa olevan veden paine kasvaa. Maaperän mallinnuksessa tämä taipumus suureen positiiviseen tilavuuden plastiseen muodonmuutokseen tulee kompensoida negatiivisella elastisella muodonmuutoksella, mikä on mahdollista ainoastaan pienentämällä tehokkaita jännityksiä. /10/

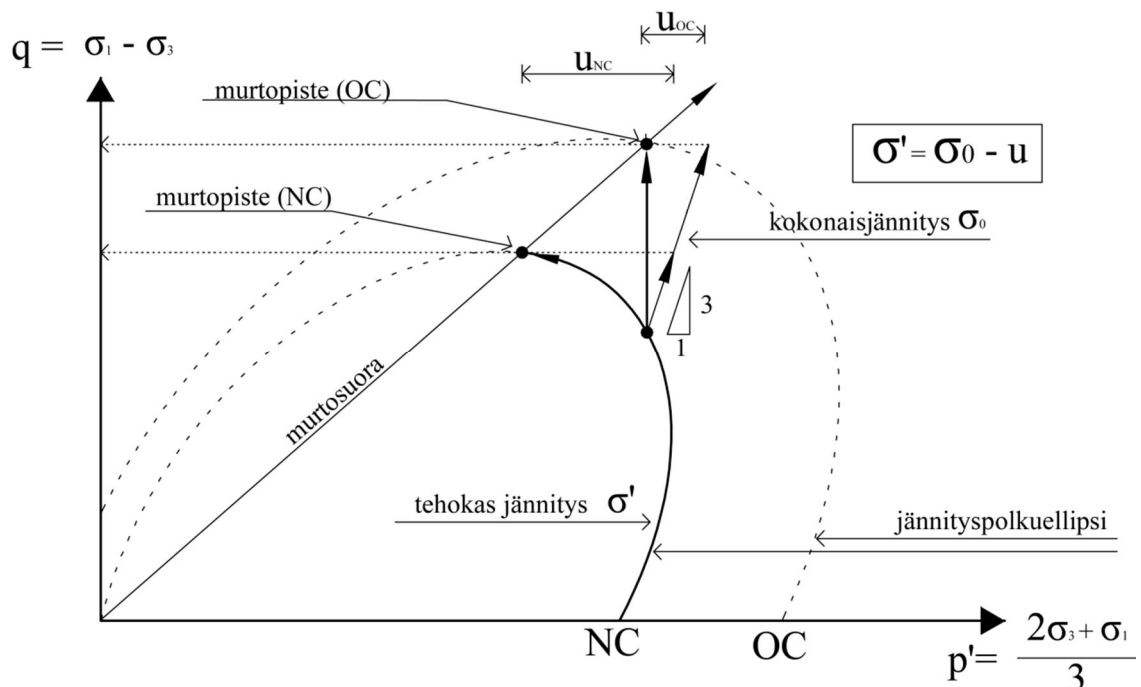
Tiedetään myös, että viruminen ja ajan vaikutus ovat merkittävässä roolissa pehmeän saven käyttäytymisessä. Savi on sitä jäykempää ja konsolidaatiojännitys sitä suurempi, mitä nopeampi kuormitus on. Tämä nähdään esim. kuormitusnopeuden riippuvuudesta esikonsolidaatiojännitykseen. Sama havaitaan myös kolmiakσιαalikokeessa; mitä korkeampia muodonmuutosnopeuksia mitataan, sitä suurempia leikkauslujuuksia saavutetaan, samaan aikaan huokospaineen kasvun hidastuessa. /10/

Ilmiö voidaan tiivistää seuraavasti: mitä pienempi on kuormitusnopeus, sitä hitaammin muutokset savessa ilmenevät. Mitä suurempi maapartikkeliin kohdistuva puristus on, sitä korkeampi on suljetun tilan huokospaine. Niinpä tehtäessä maaperän suljetun tilan tutkimuksia kolmiakσιαalikokeella, siipikairalla tai muilla menetelmillä, saadaan alhaisempia suljetun leikkauslujuuden arvoja mitä pienemmällä kuormitusnopeudella kokeet tehdään ja sitä suurempia suljetun leikkauslujuuden arvoja mitä suuremmalla kuormitusnopeudella kokeet tehdään. On kuitenkin huomioitavaa, että kuten Jan-

bu ja Senneset (1995) ovat osoittaneet, tehokkaat lujuusparametrit eivät ole riippuvaisia kuormitusnopeudesta toisin kun huokospaine./10/

4.3.2 Huokospaineen huomiointi laskelmissa

Kun savea kuormitetaan murtotilaan, kuvataan tilannetta tavallisesti jännityspolkuina p - q - kuvaajassa. Kuvaajan pystyakselilla esitetään deviatorinen jännitys, eli pääjännitysero. Kolmiaksaalikohteessa tämä tarkoittaa vallitsevan pystysuuntaisen jännityksen ja sellipaineen eroa. Vaaka-akselilla esitetään jännityssuure p' , joka kuvaa kolmen jännityssuunnan keskimääräistä jännitystä. Kun normaalikonsolidoitunutta savea aletaan kuormittaa, seuraa sen jännityspolku teoreettisesti ellipsin muotoista myötöpintaa. Samalla savi alkaa myödetä ja huokospaine kasvamaan. Huokospaine kasvaa osittain kuormituksen seurauksena, mutta osittain myös saven myötäämisestä aiheutuu huokospaineen kasvua. Savi myötää ja huokospaine kasvaa kunnes saven maksimi kapasiteetti saavutetaan ja savi murtuu. Lopullinen murtuminen tapahtuu jännityspolun kohdattua murtosuoran, jolloin saven maksimi leikkausvoima saavutetaan. Ylikonsolidoituneella savella tätä myötäämistä ei samassa mittakaavassa tapahdu, niin kauan kun jännitys pysyy alle esikonsolidaatiojännityksen. Tällöin saven jännitykset kasvavat lähes lineaarisesti kunnes saven konsolidaatiojännitys saavutetaan ja savi alkaa myötäämään. Kohdattuaan maksimileikkausvoiman, savi lopulta murtuu. Huokosvedenpaineen osuus on tällöin pienempi, eikä huokospaineen muutokset vastaa normaalikonsolidoituneen saven arvoja. /10/



Kuva 4.7. Huokosvedenpaineen muodostuminen kuormitettaessa savea sen murtotilaan. (Mansikkamäki)

Tutkimuksessaan Länsivaara on tutkinut erilaisten ja eri alueilta otettujen savinäytteiden kitkakulmia ja niiden avulla määrittänyt kitkakulmaa vastaavan myötöpinnan muodon. Myötöpinnan muodon avulla tutkimuksissa on määritetty kitkakulmaa vastaava saven myötäämisestä aiheutuva huokospaineen kasvu. Tutkimuksissa on pystytty osoittamaan, että myötäämisestä johtuvaa huokospaineenkasvua voidaan määrittää varsin tarkasti saven kitkakulmasta. Kun savi kuormituksen johdosta alkaa myötäämään, jatkuu jännitystä vastaava huokospaineen kasvu tasapainotilaa vastaavalta (K_{0NC}) suoralta kohti murtosuoraa. Olettamalla että yleinen teoria jännitys-muodonmuutos riippuvuudesta on voimassa K_0 :n konsolidointivaiheessa, on mahdollista määrittää myötöpinnan kaltevuuskulma (Länsivaara 1995, Länsivaara 1999) K_{0NC} voidaan varsin tarkasti määrittää kitkakulmasta käyttämällä Jakyn yhtälöä./10/

Tätä voidaan edelleen käyttää kuvaamaan eroa keskimääräiselle tehokkaalle jännitykselle p'_{K0} :lla ja murtosuoran välillä /16/. Nyt alkuperäistä hydrostaattista jännitystä p'_{K0} ja murtotilan hydrostaattista jännitystä p' voidaan kuvata esikonsolidaatiojännityksen ja kitkakulman avulla seuraavasti /10/;

$$p_{K0} = f(\sigma'_{cv}, \varphi) \quad (4.10)$$

$$p_f = f(\sigma'_{cv}, \varphi) \quad (4.11)$$

σ_{cv} = esikonsolidaatiojännitys
 φ = kitkakulma

Normaalikonsolidoituneella maalla esikonsolidaatiojännitystä voidaan korvata tehokkaalla pystysuoralla in-situ jännityksellä. Murtumisen aikaansaavaa huokospainetta voidaan arvioida kaavalla 4.12.

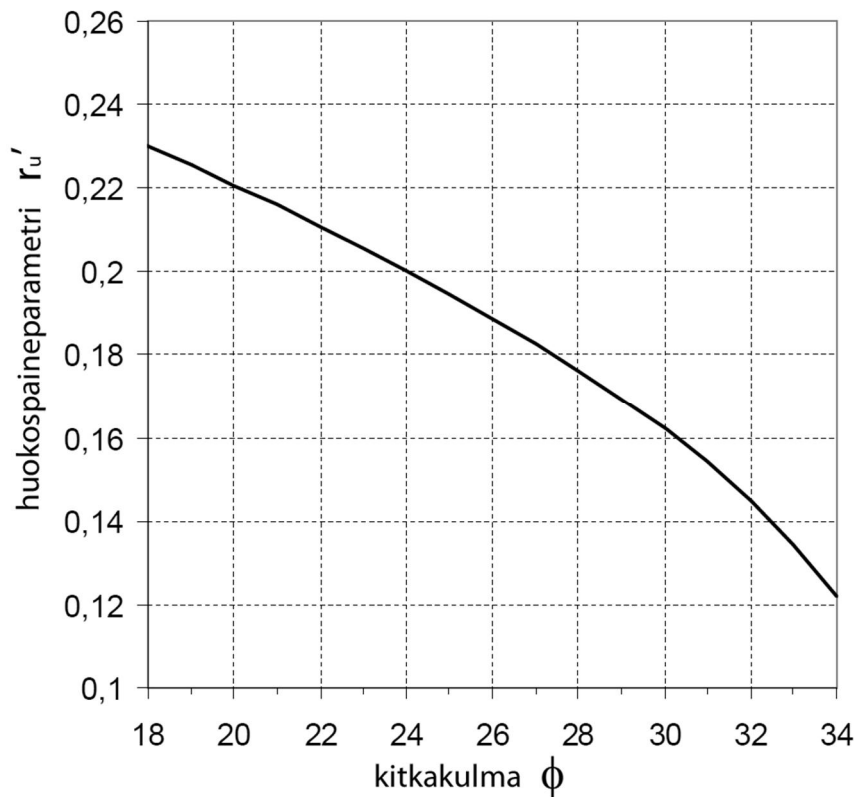
$$u_f = p_{K0} - p_f = f(\sigma'_{v0}, \varphi) \quad (4.12)$$

Rajatasapainomenetelmässä tätä voidaan käyttää soveltamalla huokospaineparametria samalla tavoin kun r_u :ta, sillä poikkeuksella, että tässä tapauksessa se kuvaa murtumisen aiheuttamaa huokospaineenkasvua ja sitä tulee soveltaa yhdessä tehokkaiden pystyjännitysten kanssa. Tämä huokospaineparametri on lyhennetty r_u' ja sen määritetään seuraavasti:

$$r_u' = \frac{u_{ey}}{\sigma_{v0}'} = \frac{1}{\sigma_{v0}'} f(\sigma_{v0}', \varphi) \quad (4.13)$$

u_{ey} = myötönmurtumisen aiheuttama huokospaineen kasvu.

Yhtälö voidaan nyt ratkaista käyttämällä oletettua elliptistä myötäpintaa, jonka on havaittu olevan varsin tarkka approksimaatio saven jännityspolusta. Yksinkertaisuuden vuoksi on esitetty r_u' ja kitkakulman välinen yhteys kuvassa 4.8.

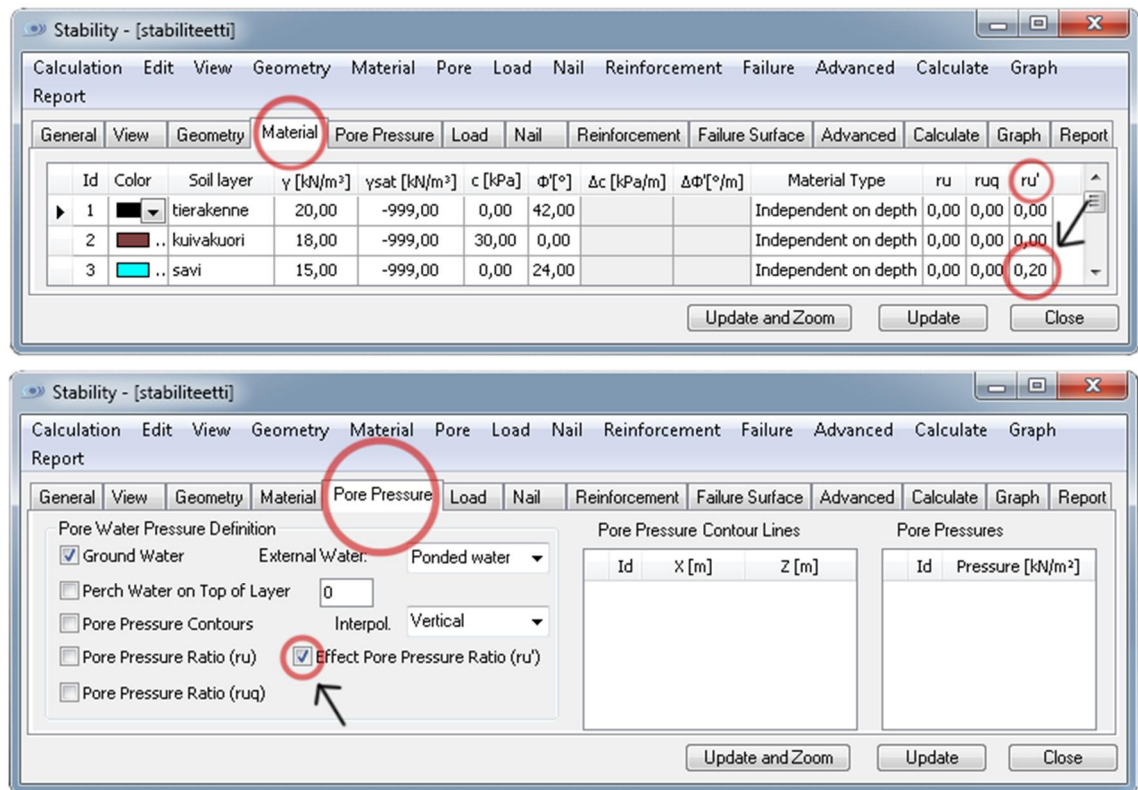


Kuva 4.8. Huokospaineparametrin r_u' :n riippuvuus kitkakulmasta. /10/

Kuten kuvassa 4.7 nähdään, murtotilan aiheuttama huokospaineen kehitys on sitä pienempää mitä suurempi on saven kitkakulma. Tämä on nähtävissä myös saven jännityspolkua approksimoivasta ellipsikuvaajasta. Mitä pystympi ellipsi muodostuu, sitä suurempi kitkakulma ja sitä pienempi etäisyys jää kokonaisjännityksen ja tehokkaan jännityksen väliin. /10/

Menetelmässä on erityisen tärkeää, että siinä käytettävät parametrit perustuvat kolmiakσιαalikoetuloksiin. Mikäli parametreja määritellään muilla tavoin ei r_u' – parametrin käyttö ole luotettavaa. On myös huomattavaa, että menetelmä kuvaa juuri normaalikonsolidoituneen saven käyttäytymistä. Etelä-Suomen savet ovat on tyypillisesti lievästi ylikonsolidoituneita. Tämä johtaa lievään huokospaineen yliarvioimiseen. Menetelmässä on kuitenkin pyritty kehittämään laskentamalli jolla murtotilassa muodostuvaa huokosvedenpainetta voitaisiin arvioida mahdollisimman yksinkertaisesti ja tätä kautta luoda työkalu arkipäiväisiin vakavuustarkasteluihin. /10/

Parametrin käyttö Geocalc 2-ohjelmassa tapahtuu syöttämällä huokospaineparametri materiaali-välilehdellä maakerroksen materiaalitietoihin. Parametrin syöttäminen on esitetty kuvassa 4.9.



Kuva 4.9. Huokospaineparametrin syöttäminen Geocalc-ohjelmassa.

Jotta ohjelma huomioi huokospaineparametrin laskelmissa, tulee se aktivoida käyttöön "Pore Pressure" välilehdeltä painamalla ruksi kohtaan "Effect Pore Pressure Ratio".

5 YLEISET HAVAINNOT TEHDYISTÄ TUTKIMUKSISTA

5.1 Yleistä

Työtä varten täydentäviä pohjatutkimuksia on tehty Vallinojan ja Ohratien kohteilla. Pirttirannan ja Tammiston kohdetta on tarkasteltu olemassa olevia pohjatutkimuksia hyödyntäen. Pohjatutkimuksia on tehty käyttäen seuraavia menetelmiä:

- Painokairaus
- Siipikairaus
- Näytteenotto (häiriintymätön)
 - Ödometrikoe (Vakiomuodonmuutoskoe, CRS)
 - Kolmiaksiaalikoe (Isotrooppisesti konsolidoitu suljettu koe, CICU)
 - Rakeisuus (Areometrikoe)
 - Kartiokoe/hienousluku

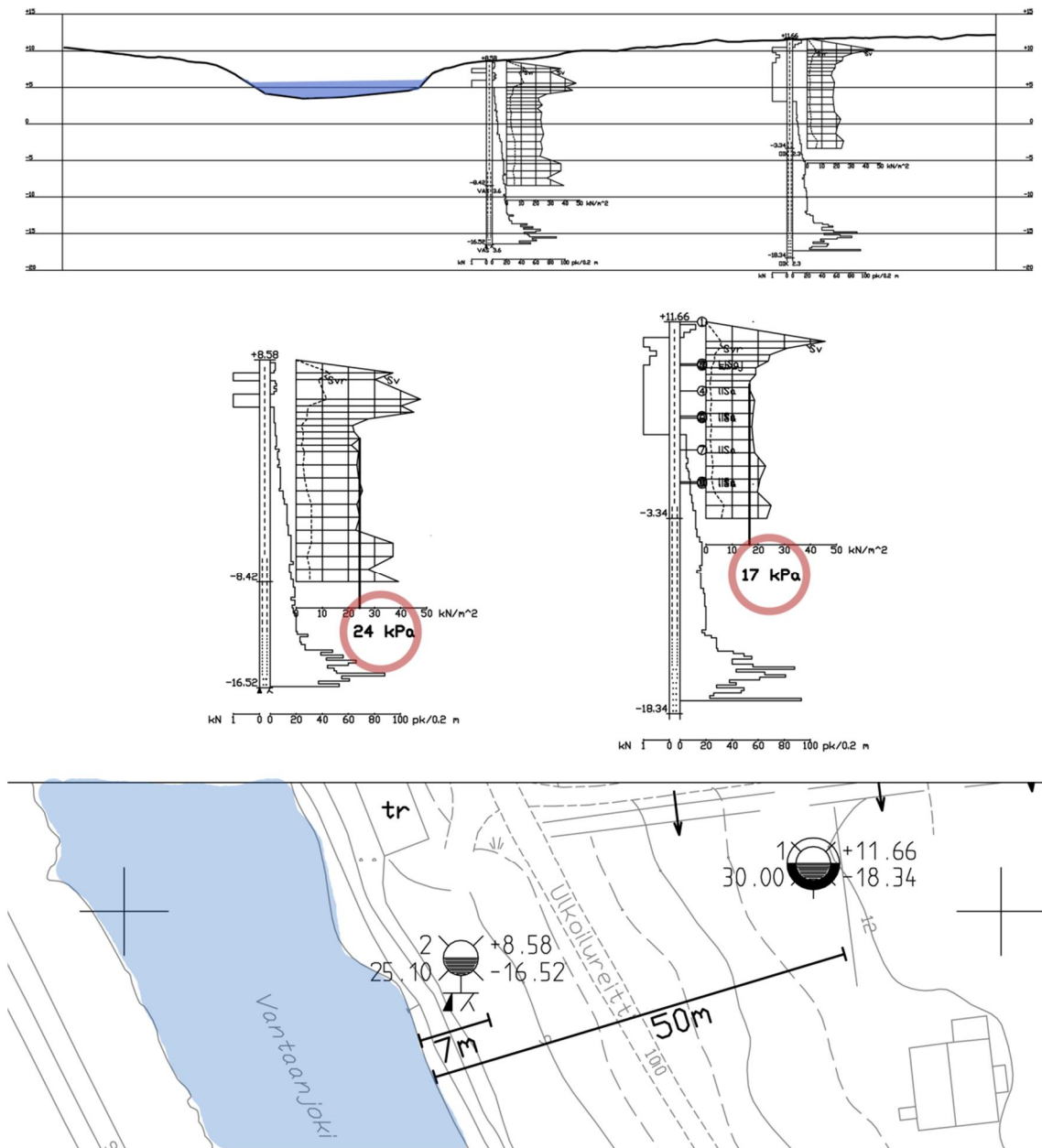
Tutkimukset on ohjelmoitu niin, että yhdessä olemassa olevan tutkimustiedon kanssa niitä voidaan käyttää mahdollisimman tehokkaasti. Tutkimustulokset ja tuloksista johdetut laskentaparametrit on esitetty tässä työssä kohdekohtaisesti mutta tuloksista on havainnoitu myös joitakin yleisiä huomioita, jotka on syytä ottaa huomioon laskentaparametreja määritettäessä.

Tarkasteltavien kohteiden pohjatutkimustuloksista voidaan tehdä yleinen huomio, mikä on havaittavissa Vantaan alueen jokilaaksoilla laajemminkin: siipikairauksella määritetty suljettu leikkauslujuus on määritetty jokitörmällä suuremmaksi kuin kauempana uomasta. Tämän ilmiön huomioiminen tarkasteluissa on olennaista, jotta varmuuksien liiallinen yli- ja aliarvioiminen voitaisiin välttää.

5.2 Jokipenkereen lujittuminen

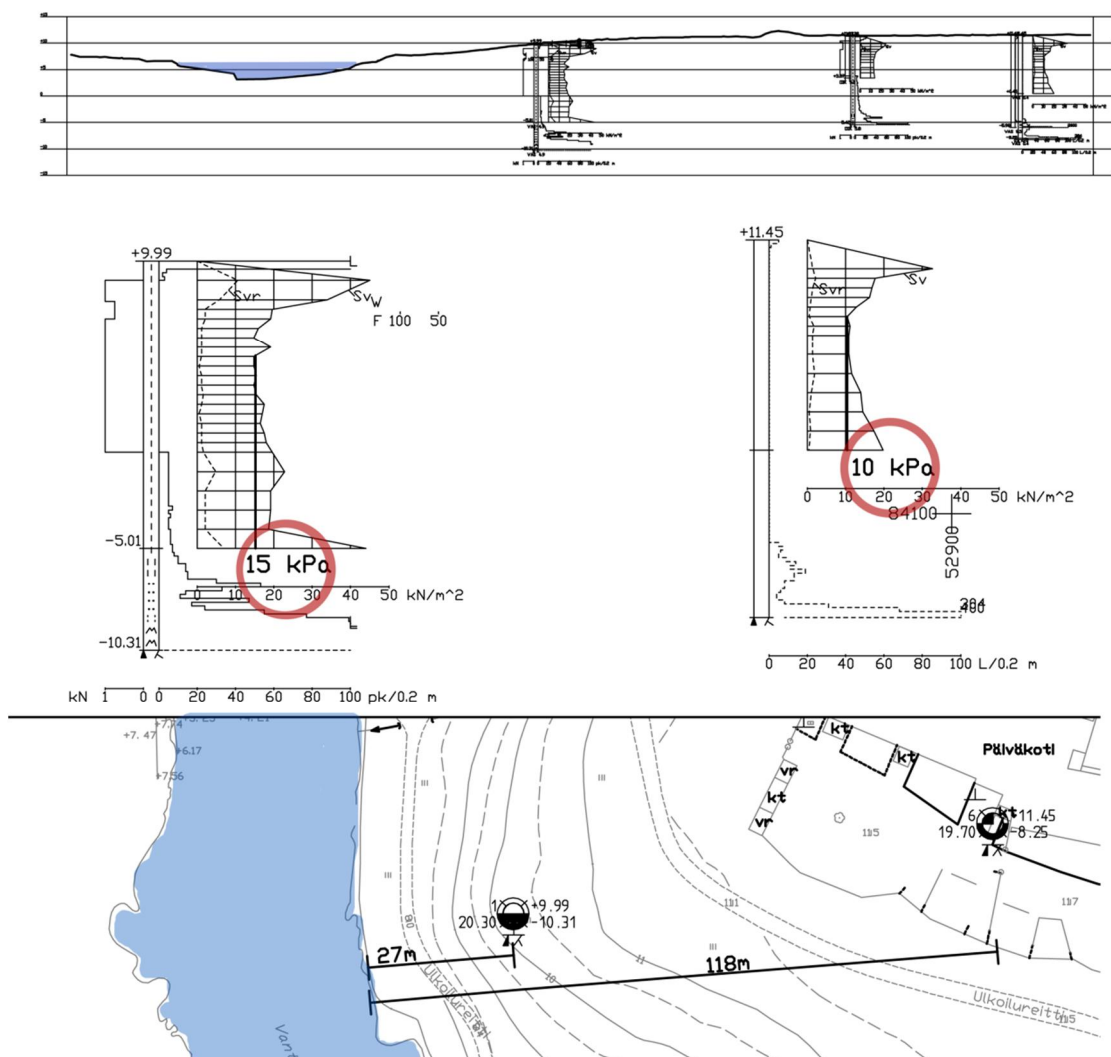
Jokitörmän stabiiliteettia tutkittaessa ollaan monesti kiinnostuneita erityisesti maan ominaisuuksista lähellä jokiuomaa. Korkea pohjavesi ja veden virtaus vaikuttavat heikentävästi maan lujuusominaisuuksiin mutta Vantaan jokien yhteydessä suurimmat suljetut leikkauslujuudet onkin monta kertaa määritetty nimenomaan lähimpänä jokiuomaa.

Ensimmäinen esimerkki on Tammiston kohdalla, missä 7 metrin etäisyydeltä jokiuomasta on siipikairalla saavutettu keskimäärin 24 kPa leikkauslujuus mutta 50 metriä jokiuomasta siipikairalla saavutettu lujuus on vain luokkaa 17 kPa. Molemmissa kairauksissa maalajin on tulkittu olevan savea.



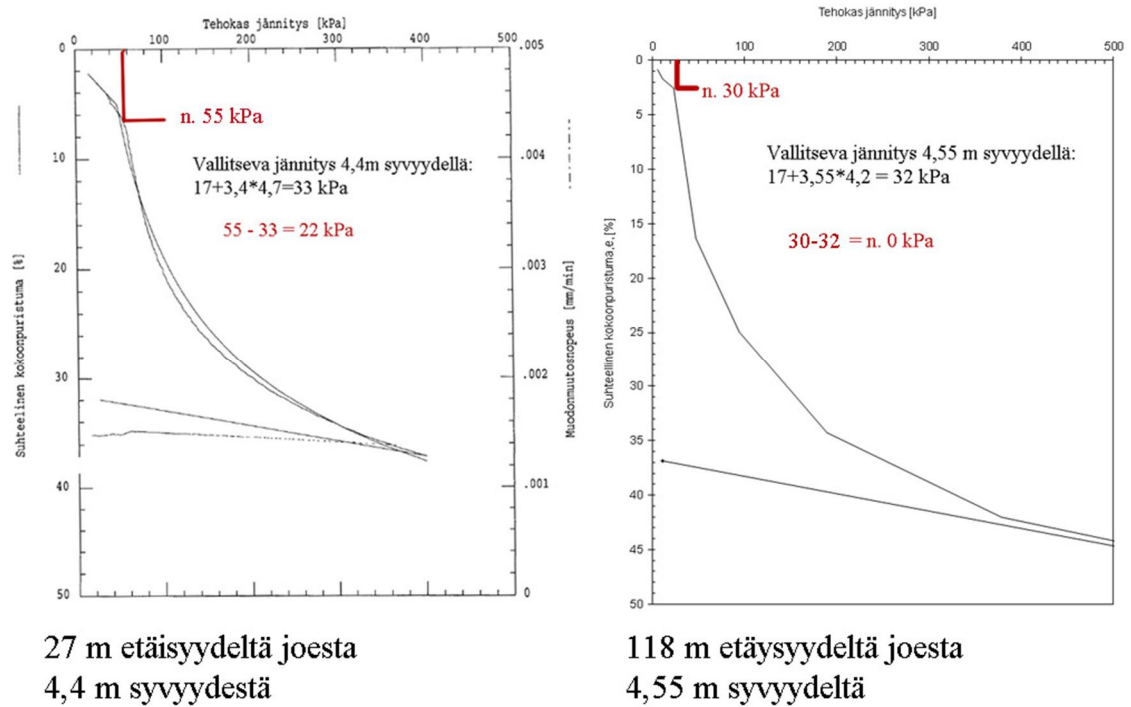
Kuva 5.1. Siipikairauksella määritetyn suljetun leikkauslujuuden suuruus 7m ja 50m etäisyydellä joesta Tammiston koulun kohdalla.

Tammistosta löytyy toinenkin esimerkki, missä etäisyydet ovat vielä suurempia. Tammiston päiväkodin kohdalta määritetyissä siipikairatuloksissa on nähtävissä sama ilmiö.



Kuva 5.2. Siipikairauksella määritetyn suljetun leikkauslujuuden suuruus 27m ja 118m etäisyydellä joesta Tammiston päiväkodin kohdalla.

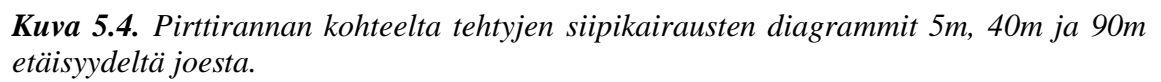
Päiväkodin kohdalta otetuista näytepisteistä on tehty myös ödometrikokeet ja määritetty indeksiominaisuuksia laboratoriossa. Vertailtuna kuvassa 5.3 on molemmista näytepisteistä n. 4,5 metrin syvyydeltä otetun näytteen ödometrikokeen tulokset. Jokipenkereen puoleisesta näytteestä maalajiksi on määritetty lihava savi, jonka tilavuuspaino on $14,7 \text{ kN/m}^3$. Kauempaa joesta otetun näytteen maalajiksi on määritetty $14,2 \text{ kN/m}^3$ tilavuuspainon omaava liejuinen savi. Ödometrikokeen tuloksista voidaan havaita jokipenkereen näytteessä n. 20 kPa ylikonsolidoituminen. Kauempaa joesta otetusta näytteestä ei merkittävää ylikonsolidoitumista pystytäkään havaitsemaan. Näiden havaintojen perusteella jokipenkereen voitaisiin sanoa lujittuneen.

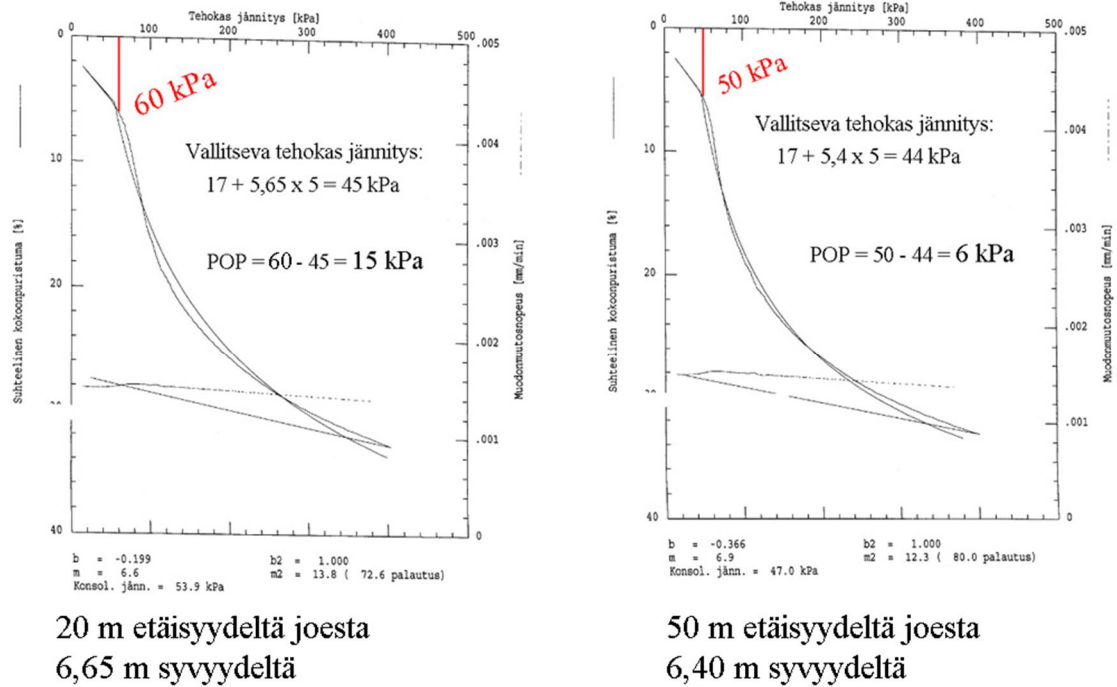


Kuva 5.3. Tammiston päiväkodin kohdalta 27m ja 118m etäisyydeltä otettujen näytteiden ödometrikokeen tulokset n. 4,5 m syvyydeltä.

Kolmas esimerkki on Pirttirannasta, jossa tuloksissa on havaittavissa täysin sama ilmiö. Pirttirannasta siipikairaustuloksia on olemassa vielä huomattavan kaukaakin joesta, jotka edelleen vahvistavat ilmiötä. Kaukaisimmat tutkimuksessa käsitellyt havainnot olivat yli 300 metrin etäisyydellä joesta. Niin kaukana joesta otetuilla lujuuksilla ei ole tekemistä itse jokirannan stabiliteetin kannalta, mutta ne vahvistavat olettamusta siitä, että lähialueella savikerros on kauttaaltaan jokipengertä heikompaa. Pirttirannan kohteella 300 metrin etäisyydeltä tehdyissä siipikairauksissa suljettu leikkauslujuus jäi paikoin alle 15 kPa:n.

41





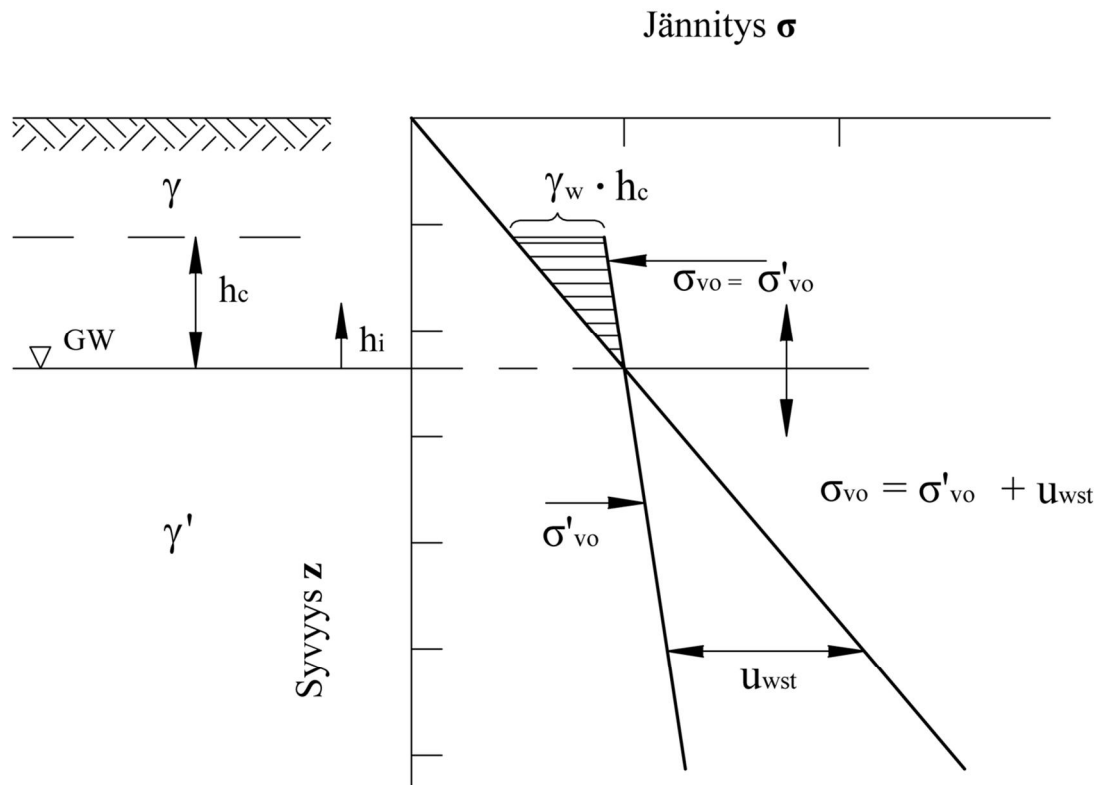
Kuva 5.5. Pirttirannan ödometrikokeet 20 m ja 50 m etäisyydeltä joesta. 6,5 metrin syvyydellä konsolidaatiojännitys laskee joesta pois päin siirryttäessä 30 metrin matkalla n. 10 kPa.

Myös pirttirannan esimerkissä on ödometrikokeen perusteella savikerros ylikonsolidoitunempaa lähempänä jokea. 20 metrin etäisyys on tosin hieman liian suuri, jotta itse jokipenkereen lujittumista päästäisiin tarkastelemaan.

5.2.1 Syitä maan lujittumiseen

Tulokset osoittavat, että maaperä joen läheisyydessä on jossain määrin ylikonsolidoitunut, eli maan jännitystila on ollut jossain vaiheessa suurempi kuin maassa tällä hetkellä vallitseva, maan omasta painosta aiheutuva jännitystila. Koska joki on muodostunut uurtumalla savikkoon, ei kasvanutta jännitystilaa selitä kasautuneet maamassat. Yksi selitys lujuuden kasvuun jokitörmällä lienee jokiuoman kuivattava vaikutus. Tämä yksistään selittäisi ainoastaan pintamaan lujuuden kasvun, sillä joen kuivattava vaikutus ei joen pinnan alapuolella ole enää pätevä. Siipikairalajuudet ovat sen sijaan paikoin suurempia myös joen pohjan alapuolella. Jokitörmän kuivumisesta sen sijaan aiheutuu toinenkin välillinen jännityksiä kasvattava ilmiö. Kun maassa oleva vesi poistuu, häviää myös kuivaneelta osalta tehokasta tilavuuspainoa pienentävä nosteen vaikutus, tästä johtuva jännityslisäys vaikuttaa myös syvemmällä maassa.

Toinen mahdollinen selitys jokipenkereen lujittumiselle on kapillaarijännitysten vaikutus. Kapillaarijännityksen vaikutus vallitsevaan jännitykseen on esitetty kuvassa 5.6.



h_c = kapillaarinen nousukorkeus

h_i = korkeus pojaveden pinnasta ylöspäin

σ'_{vo} = tehokas vertikaalinen jännitys

u_{wst} = staattinen vedenpaine syvyydellä z

Kuva 5.6. Kapillaarijännityksen vaikutus vallitsevaan jännitykseen /22/.

Hienojakoisessa savessa kapillaarinen vedennousu voi olla useita tai useita kymmeniä metrejä. Kapillaarisella nousukorkeudella tarkoitetaan korkeutta vapaasta vedenpinnasta, mihin vesi kohoaa pintajännityksen sekä maa-aineksen ja veden välisen vetovoiman ansiosta. Ohuessa putkessa veden kohoaminen on suoraan verrannollinen pintajännitykseen ja kääntäen verrannollinen kapillaariputken läpimittaan.

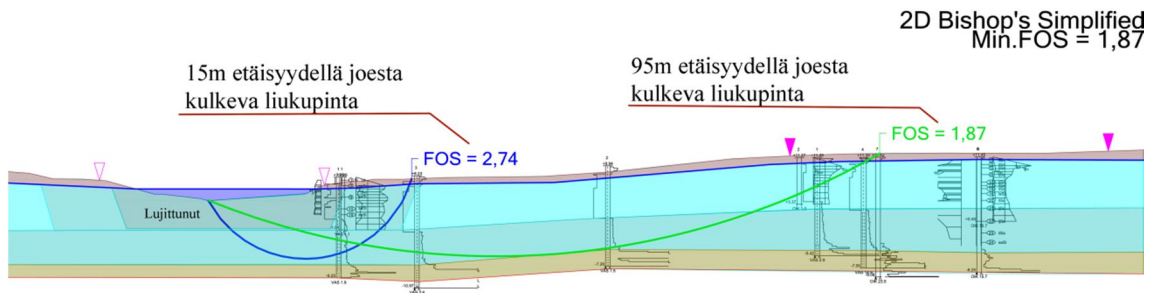
Pohjavedenpinnan alapuolella huokosveden paine puristusjännityksenä pienentää vallitsevaa tehokasta jännitystä. Kapillaarijännitys on imuvoimana vetojännitys, joten se on negatiivinen ja suurentaa kokonaisjännitystä sekä tehokasta jännitystä. Pohjavedenpinnan yläpuolella kapillaarivyöhykkeessä tehokas jännitys voidaan laskea kaavalla

$$\sigma'_{vo} = \gamma * z + \gamma_w * h_i \quad (4.4)$$

Kapillaarista imua tapahtuu etenkin silloin, kuin tyypillisesti korkealla oleva pohjavedenpinta laskee maassa. Tällöin joen läheisyydessä joen vaikutuksesta pohjavedenpinta laskee enemmän joen kuivattavan vaikutuksen johdosta. Tällöin pääsee syntymään veden kapillaarista nousua kohti maan pintaa. Samalla syntyy myös kapillaarijännityksiä joiden vetävä voima kasvattaa vallitsevia jännityksiä ja pitkän ajan saatossa mahdollisesti lujittaa maata. /28/

5.2.2 Lujittuneen penkereen huomiointi laskelmissa

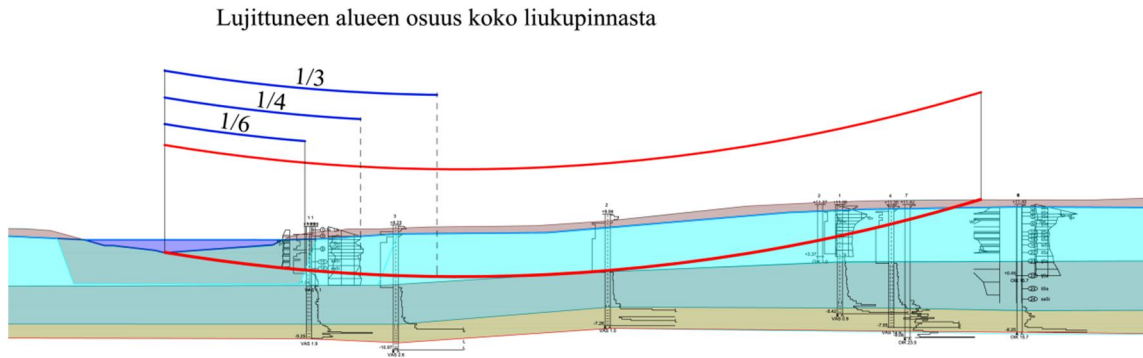
Ilmiön huomiointi jo pohjatutkimusvaiheessa on tärkeää. Mikäli oletetaan maan suljetun leikkauslujuuden olevan heikoimmillaan lähempänä jokea, voidaan tehdä virheellisiä päätelmiä todellisesta lujuudesta. Tilanteessa, jossa haetaan heikointa suljetun leikkauslujuuden arvoa tekemällä kairaukset mahdollisimman lähelle jokea, päädytään juuri päinvastaiseen tilanteeseen, tulokseksi saadaankin tutkittavan leikkauksen suurin suljetun leikkauslujuuden arvo. Tilanne on esitetty kuvassa 5.7.



Kuva 5.7. Lyhyen ja pitkän liukupinnan tuottaman varmuuskertoimen ero.

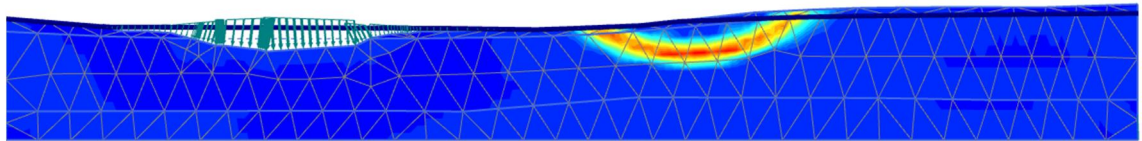
Tällaisessa tilanteessa voi pitkä liukupinta osoittautua vaarallisimmaksi stabiliteetin kannalta. Ongelmasta päästään eroon, mikäli käytetään koko leikkauksessa riittävän kaukaa joesta määritettyä, heikointa lujuusarvoa, koko savikerroksen paksuudella. Tällöin laskelmissa ollaan varman puolella mutta todellisia lujuuksia hyödynnetään heikosti. Geometriasta riippuen pitkä liukupinta saattaa olla vaarallisin huolimatta siitä, käytetäänkö jokipenkereellä lujittuneen saven parametreja vai ei. Jokeen päin viettävässä rinteessä heikoimman varmuuden tuottava liukupinta voi olla joka tapauksessa kaukanakin joesta, mielletään jokitörmä lujittuneeksi tai ei.

Jotta lujittuneen vyöhykkeen voisi luotettavasti mallintaa laskelmissa, tulisi pohjatutkimuksia tehdä riittävän tiheästi, jotta lujittuneen saven etäisyys joesta voitaisiin luotettavasti arvioida. On kuitenkin huomattava lujittuneen osan todentamisesta saatavan hyödyn ja tehtävien pohjatutkimusten vaatimien resurssien välinen hyötysuhde. Pitkillä, ja monta kertaa vaarallisimmilla liukupinnoilla lujittuneen osan merkitys kokonaisvarmuuteen on sitä pienempi, mitä pidempi liukupinta on kysymyksessä.



Kuva 5.8. Lujittuneen jokitörmän vaikutus pitkällä liukupinnalla.

Esimerkkinä tilanteesta on esitetty kuvassa 5.8. Mikäli lujittunut jokipenger rajoittuu hyvin lähelle jokea, on sen osuus pitkän liukupinnan koko leikkauspinnasta varsin pieni. Toisaalta, on myös mahdollista, ettei lujittunut vyöhyke vaikuta pitkän liukupinnan varmuuskertoimiin millään tavalla, jos liukupinta kulkee riittävän syvällä, missä lujittumisen vaikutus lopulta häviää. Jännityserot tasaantuvat joka tapauksessa syvemmälle maahan mentäessä. On myös otettava huomioon mahdollisuus, ettei vaarallisin liukupinta päädykään jokiuomaan. Kaltevassa maastossa liukupintoja voi syntyä myös laskevassa rinteessä myös ylempänä, kuten kuvassa 5.9. on esitetty.



Kuva 5.9. Esimerkki tilanteesta, jossa vaarallisin liukupinta ei pääty jokeen vaan muodostuu kaltevaan rinteeseen.

Kokonaisuudessaan lujittumisilmiön voidaan siis katsoa johtavan kahteen huomioitavaan tekijään, mikäli ilmiötä ei tiedosteta:

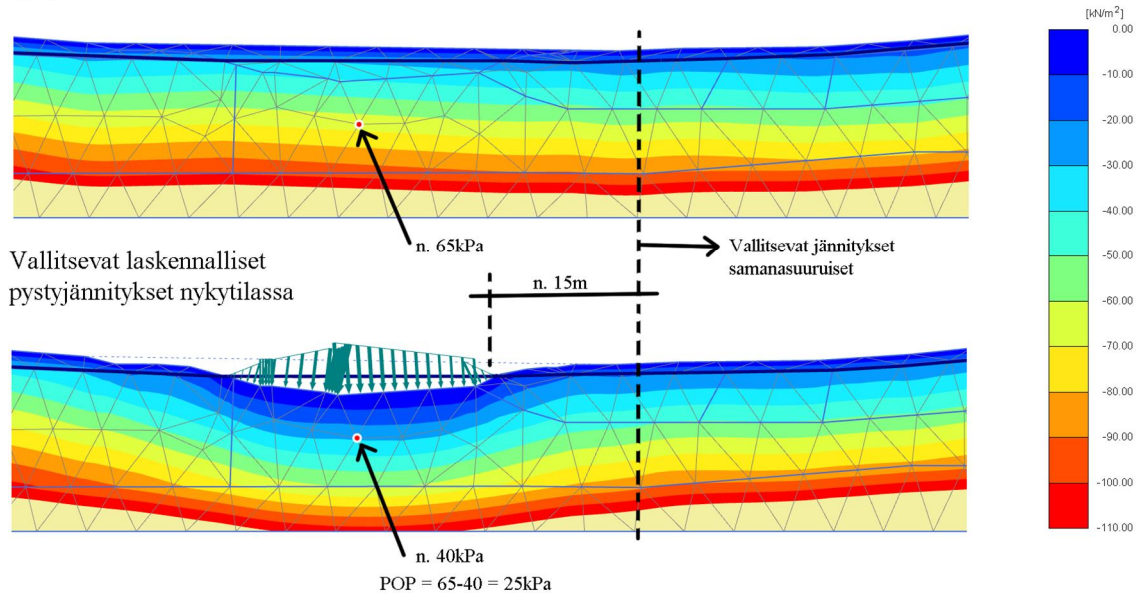
1. Päädytään tekemään pohjatutkimuksia ainoastaan lujittuneelta vyöhykkeeltä ja tätä kautta yliarvioimaan saven lujuutta laajemmin.
2. Päädytään tarpeettoman varovaisiin vakavuustarkasteluihin

Tässä työssä on lujittuneen alueen laajuutta pyritty määrittelemään esimerkkikohteen avulla.

Lujittumista on pyritty mallintamaan Plaxis- ohjelmalla, Soft Soil- materiaali-mallia käyttäen. Koska tiedetään Vantaanjokien syntyneen uurtumalla savikkoon, voidaan jokien edeltävän tilanteen olettaa olleen tasainen maanpinta. Laskelmissa on vertailtu maaperän jännitystilaa ennen joen syntymistä ja nykyisin vallitsevissa olosuhteissa. Laskelmissa on maasto mallinnettu ennen joen syntymistä tasaiseksi, jonka jälkeen uoma on kaivettu ja annettu maan konsolidoitua. Mallista nähdään, että nykytilanteessa jokiuoman kaivautumisen myötä maa on joen alla ylikonsolidoitunutta tai nykyisten vallitsevien jännitysten olevan ympäristöä suurempia. Ylikonsolidoituminen ei ulotu jokiuomasta kovinkaan kauas, vaan jännitykset tasaantuvat hyvin nopeasti jokiuomasta

kauemmaksi siirryttäessä. Esimerkkilaskelmassa jännitykset vastaavat alkuperäistä jännitystilaa jo 15 metrin etäisyydellä joesta, mutta etäisyys on riippuvainen uomän syvyydestä ja reunojen kaltevuudesta. Tehty jokiuoman synnyn aiheuttamat jännitysmuutokset pohjamaassa on esitetty kuvassa 5.10.

Vallitsevat laskennalliset
pystyjännitykset ennen joen
syntymistä



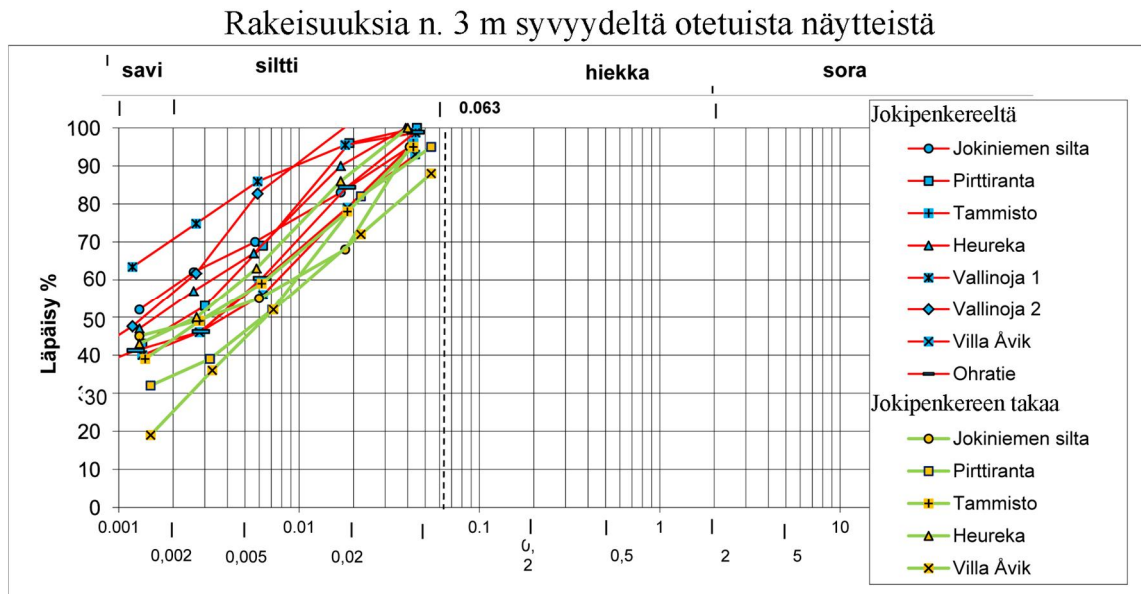
Kuva 5.10. Ylikonsolidoituneen vyöhykkeen arviointi Plaxis-ohjelmalla.

Tehdyssä Plaxis- tarkastelussa ei kapillaarijännityksen vaikutusta ole otettu huomioon. Tehokkailla parametreilla laskettaessa joen alla voidaan lujittumista mallintaa jättämällä huokosvedenpaineen vaikutus huomioimatta. Joen läheisyydellä osittaista lujittumista on vertailulaskelmissa kokeiltu mallintaa siten, että huokospaineparametrin r_u :n arvona on käytetty puolikasta siitä, mitä saven kitkakulman mukaan tulisi normaalikonsolidoituneella alueella käyttää. Suljetulla leikkauslujuudella laskettaessa ei jokitörmältä tutkitua suurempaa leikkauslujuutta tulisi käyttää tätä vyöhykettä leveämmällä alueella, ellei tutkimuksin ole osoitettu saven olevan lujittunutta myös kauempana joesta

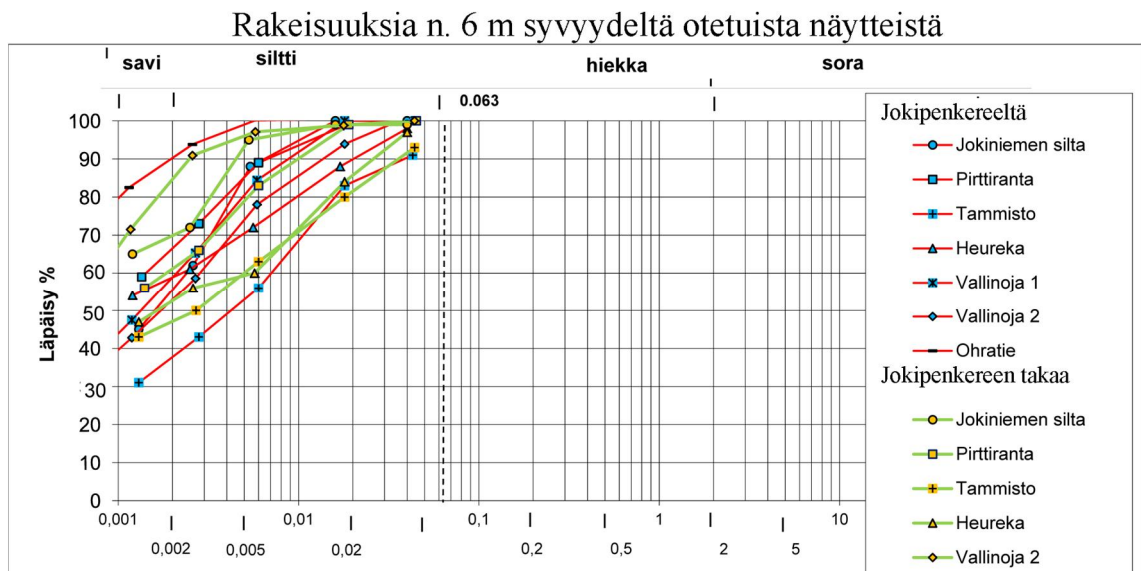
5.3 Tutkimustulosten yleispiirteitä

5.3.1 Rakeisuudet ja vesipitoisuudet

Rakeisuuden avulla voidaan varmistaa kairauksilla määritetty maalaji. Myös saven tarkempi koostumus on tärkeää tietoa tulkittaessa muita tutkimustuloksia, etenkin siltin ja saven keskinäinen suhde vaikuttaa monilta osin saven käyttäytymiseen. Siltipitoisuuden kasvaessa saven häiriintymisherkkyys kasvaa. Myös kerroksellisuus vaikuttaa saven käyttäytymiseen ja selittää poikkeamia laboratoriotuloksissa. Rakeisuuskäyriä eri kohteilta, 3m ja 6m syvyydeltä, on kerätty kuviin 5.11 ja 5.12.



Kuva 5.11. Rakeisuuksikäyriä eri kohteilta, n. 3 m syvyydestä otetuista näytteistä.



Kuva 5.12. Rakeisuuksikäyriä eri kohteilta, n. 6 m syvyydestä otetuista näytteistä.

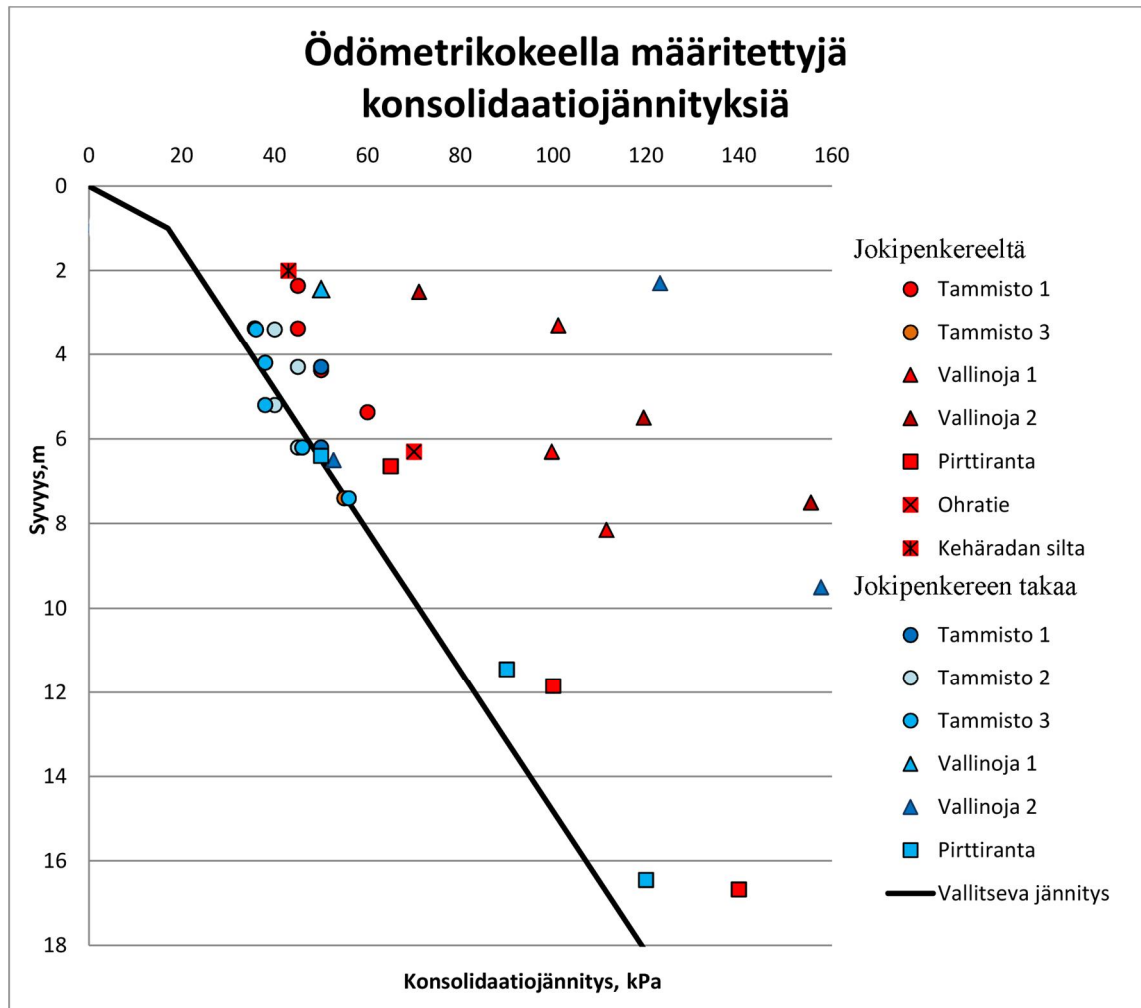
Yleisesti tutkituista rakeisuuksista voidaan todeta maaperän olevan kaikilla tutkimusalueilla hyvin savista. Kuvassa 5.10 on esitetty näytteiden rakeisuuskäyriä 3 metrin syvyydestä, jokipenkereeltä tehdyt rakeisuudet on esitetty punaisella ja kauempaa joesta tehdyt rakeisuudet vihreällä käyrällä. Kyseisessä otannassa jokipenkereeltä tehdyt rakeisuudet ovat hieman savipitoisempia kuin kauempaa joesta tehdyt. Kauempana joesta maan pintakerrokset ovat siis ainakin paikoin silttipitoisempia mikä kasvattaa häiriintymisherkkyyttä ja vaikuttaa näin mahdollisesti siipikairatuloksiin. 6m syvyydestä tehdyille rakeisuuksille ei ole havaittavissa vastaavaa ilmiötä. Savipitoisuus 6m syvyydessä on kauttaaltaan suurempi kuin 3 m syvyydestä otetuissa näytteissä.

Rakeisuuden määrittäminen on varsin työläs tapa selvittää maalajeja, eikä sitä voida suositella tehtäväksi kaikkialla. Kairausdiagrammin tueksi voidaan sitä vastoin tehdä näytteistä vesipitoisuuden määrittäksiä joiden avulla etenkin savikerroksen laajuutta voi-

daan arvioida pelkkää kairaustietoa varmemmin. Tässä työssä vesipitoisuuden määrittämisä on käytetty savipitoisuuden arviointiin ja auttamaan maalajirajojen määrittämisessä.

5.3.2 Ödometrikokeet

Ödometrikokeita on tehty maan konsolidaatiojännitysten selvittämiseksi. Kokeen tuloksena saadaan myös muita tietoja mutta jokipenkereen lujittumisilmiön selvittämiseksi mielenkiintoisinta on selvittää maan jännityshistoriaa. Myös kolmiaksaalikokeen sellipaineet osataan valita paremmin, kun maakerroksesta pystytään määrittelemään normaalikonsolidoituneen ja ylikonsolidoituneen alueen raja. Tämän työn yhteydessä tehtyjä, sekä muutamia aiemmin ödometrikokein määritettyjä konsolidaatiojännityksiä eri syvyyksistä on esitetty kuvassa 5.13. Kuvassa tutkimuspisteet on eroteltu karkeasti jokipenkereeltä ja jokipenkereen takaa tehtyihin kokeisiin.



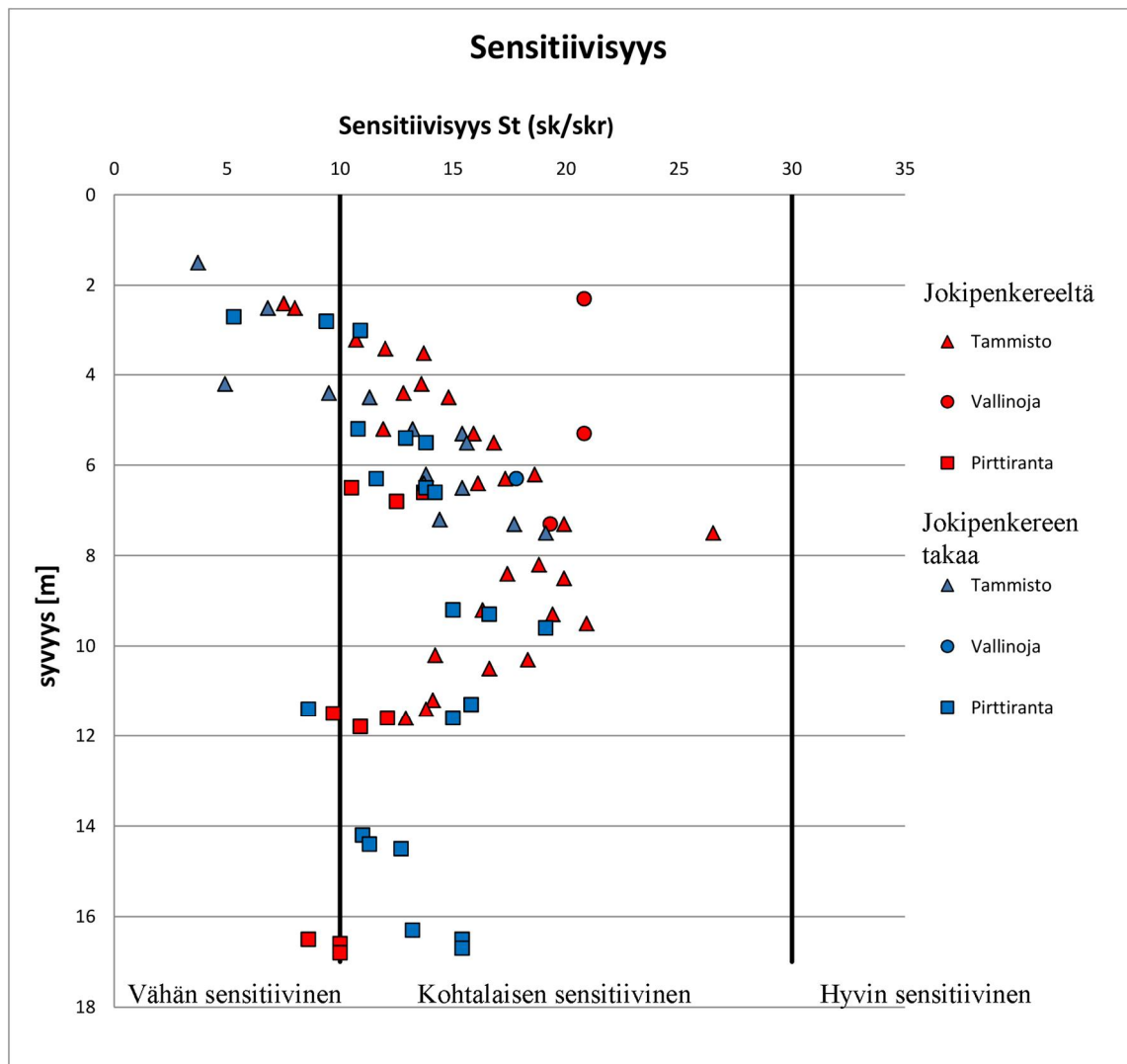
Kuva 5.13. Ödometrikokeella määritettyjä konsolidaatiojännityksiä eri kohteilta sekä jokipenkereeltä otetuista näytteistä että kauempaa joesta otetuista näytteistä.

Kuvassa 5.13 esitetyissä konsolidaatiojännityksistä havaitaan savikon olevan kauempana joesta kutakuinkin normaalikonsolidoitunutta tai lievästi ylikonsolidoitunutta. Jokipenkereeltä tehdyt kokeet ovat tuottaneet aavistuksen suurempia konsolidaatiojännityk-

sen arvoja ja ovat lähes poikkeuksetta ainakin jossain määrin ylikonsolidoituneita. Ku-
vassa on esitetty myös likimääräinen vallitsevan jännityksen suora, joka on arvioitu
olettamalla savikerroksen ominaispainon olevan 15kN/m^3 ja pohjaveden olevan 1 met-
rin syvyydellä maanpinnasta. Tämä tilanne vastaa hyvin tutkittujen kohteiden olosuhtei-
ta.

5.3.3 Kartiokokeet

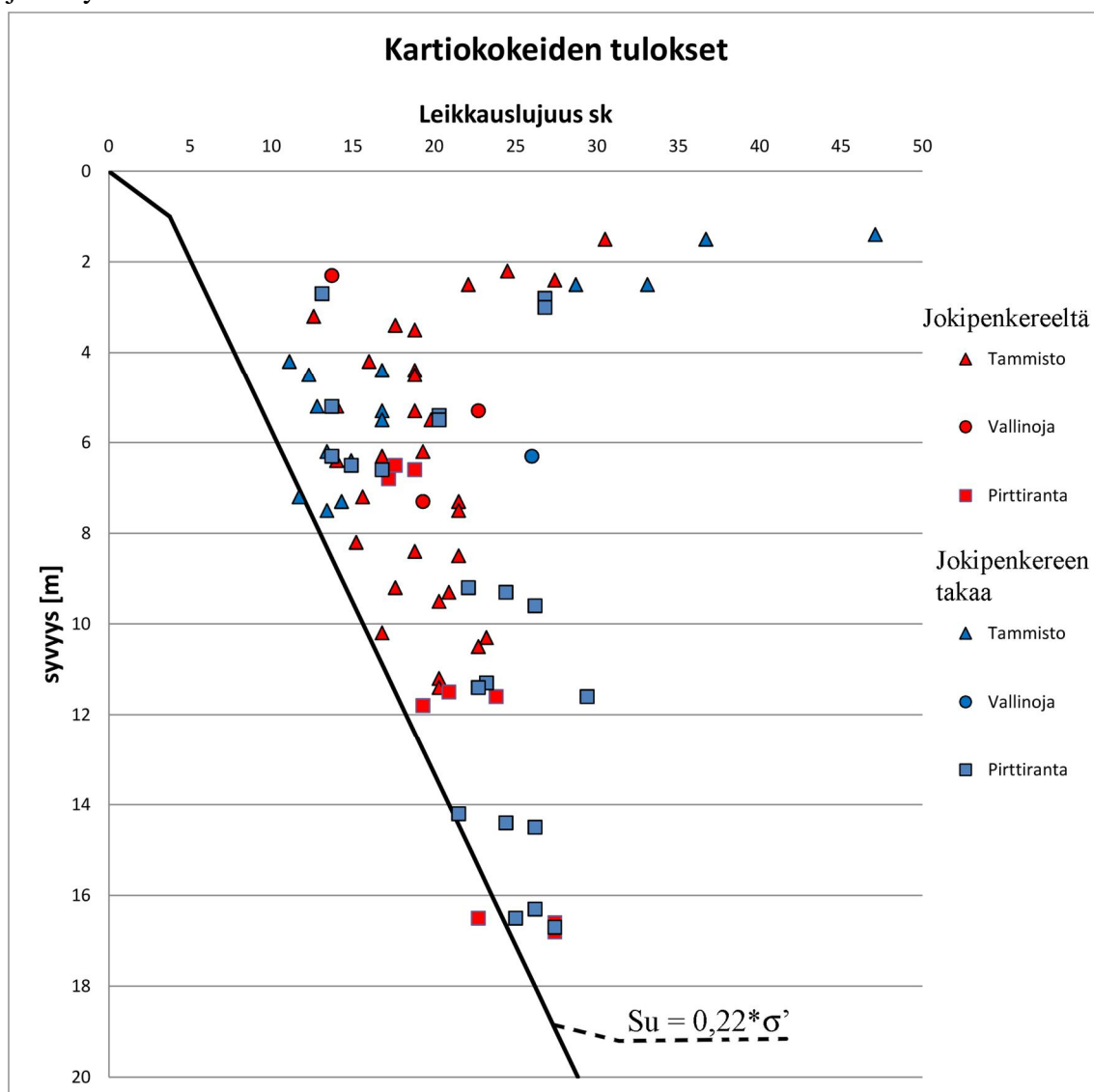
Kartiokokeita on tehty maanäytteistä, jotta voitaisiin selvittää saven sensitiivisyyttä ja
suljettua leikkauslujuutta. Sensitiivisyyttä käytetään hienorakeisen maan lujuuden alen-
tumisen mittana häirityssä tilassa, eli häiriintymisherkkytenä. Sensitiivisyys määrite-
tään maalajin luonnontilaisen suljetun leikkauslujuuden suhteena saman maa-aineksen
leikkauslujuuteen silloin kun sen rakenne on täysin häiritty. Tutkimuksissa määritetyt
sensitiivisyydet on koottu kuvaan 5.14. /27/



Kuva 5.14. Sensitiivisyyden arvoja kerättynä samaan kuvaajaan.

Kartiokokeessa määritetään maanäytteen suljetun leikkauslujuuden suuruutta laborato-
rio-olosuhteissa. Kartiokokeen onnistuminen on riippuvainen näytteen laadusta. Kar-

tiokokeita voidaan pitää vertailukohtana siipikairauksille. Työn yhteydessä tehdyt ja olemassa olleet kartiokokeiden tulokset on kerätty samaan taulukkoon ja esitetty kuvassa 5.15. Tuloksissa ei ole havaittavissa eroa jokipenkereeltä tai kauempaa joesta otettujen näytteiden välillä.



Kuva 5.15. Kartiokokeiden avulla määritettyjä suljetun leikkauslujuuden arvoja

Kartiokokeiden tuloksissa nähdään siipikairatuloksia johdonmukaisemmin suljetun leikkauslujuuden kasvu syvyyden funktiona. Kuvaajassa on esitetty myös kaavassa 5.1 esitetty, tehokkaaseen pystyjännitykseen perustuva karkea arvio suljetun leikkauslujuuden suuruudesta. Kartiokokeiden tulokset korreloivat kohtalaisesti edellä esitettyä approksimaatiota, antaen kauttaaltaan hieman sitä suurempia arvoja. Tämä on odotettua sillä kaavassa 5.1 esitetty approksimaatio on varovainen arvaus leikkauslujuuden arvosta.

5.3.4 Siipikairatulokset

Siipikairalla määritetyissä maan suljetuissa leikkauslujuuksissa on paljon epävarmuustekijöitä, jotka tulisi huomioida jo siipikairauspisteitä ohjelmoitaessa. Ainoastaan siipikairauksiin perustuvassa parametrien määrittämisessä voidaan päätyä huomattavaan maan leikkauslujuuden aliarvioimiseen. Vaikka ongelmana on tavallisesti leikkauslujuuden aliarvioiminen, on huomattavaa, että menetelmällä on mahdollista myös yliarvioida maan leikkauslujuutta, mikäli menetelmää käytetään väärin.

Siipikairauksessa menetelmänä suurimpana ongelmana on maan häiriintyminen ennen leikkauslujuuden määrittämistä. Silttipitoisuus lisää savisen maan häiriintymisriskiä, ja vaikuttaa tutkimustuloksiin. Tutkittavien alueiden savet ovat varsin silttipitoisia vaikka ne pääosin määritetäänkin lihaviksi saviksi, silttiosuus on jopa 40 %. Kairauksessa ongelmana on maan häiriintyminen jo siinä vaiheessa kun kaira tunkeutuu maahan. Suojaputken kanssa tehtävät kairaukset vähentävät ongelmaa mutta tällöinkin häiriintyminen on mahdollista. Epäonnistuneet siipikairaukset eivät johdu välttämättä huonosti tehdystä kairaustyöstä tai tekijöiden virheistä vaan saven siipikairaaminen ilman häiriinnyttämistä on paikoin mahdotonta.

Maan suljettua leikkauslujuutta siipikairalla määritettäessä määritetään käytännössä murtotilan lujuuksia. Siipikairauksessa savi on muutostilassa ja saatu leikkauslujuuden arvo on valmiiksi murtotilan lujuus. Mikäli maan lepotilan leikkauslujuutta arvioidaan vallitsevan tehokkaan pystyjännityksen tai konsolidaatiojännityksen avulla, kaavalla 4.2, ei oteta huomioon kuormituksen aiheuttamaa huokosvedenpainetta. Suljetun leikkauslujuuden suhdetta vallitsevaan jännitystilaan on tutkittu ja havaittu suuntaa antava suhde tehokkaan pystyjännityksen ja maan leikkauslujuuden välille./26/

$$Su_0 = \alpha * \sigma' \quad (5.1)$$

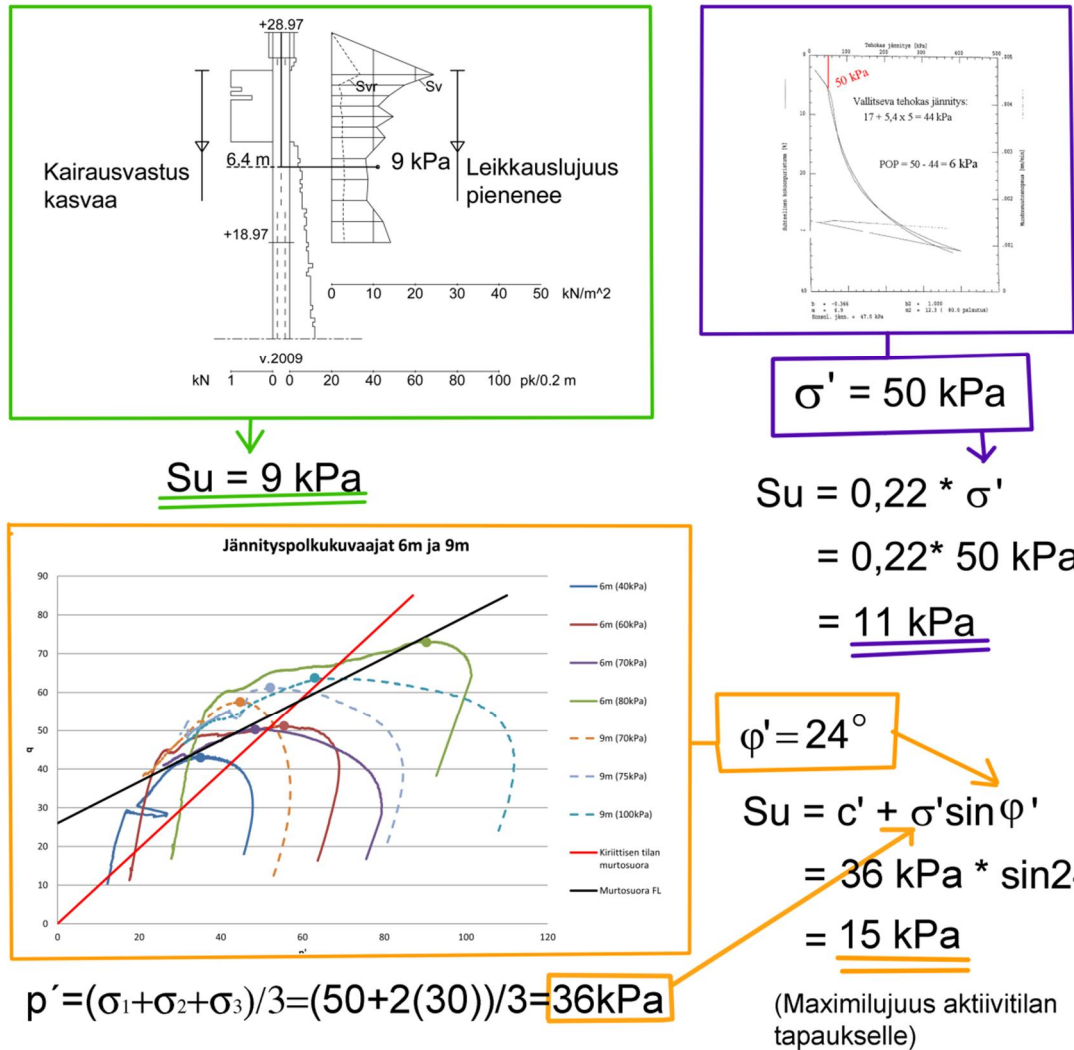
σ' = konsolidaatiojännitys tai tehokas pystyjännitys.

α = kokemusperäinen kerroin, tavallisesti 0,2...0,25, tässä työssä käytetään arvoa 0,22

Kaavassa 5.1. esitettyä maan leikkauslujuuden määrittämistä voidaan käyttää lähinnä siipikairatulosten todenmukaisuuden arviointiin.

Ilmiötä voidaan havainnollistaa esimerkkikohteista tehtyjen pohjatutkimusten avulla. Tilanne on esitetty kuvassa 5.16. Pirttirannasta tehdyn kolmiaksiaalikokeen mukaan saven kitkakulma on n. 24°. Kuuden metrin syvyydestä tehdyn ödometrikokeen perusteella maan konsolidaatiojännitys on 50 kPa suuruinen. Siipikairalla määritetty leikkauslujuus samalta syvyydeltä on 10 kPa, eikä suljetussa leikkauslujuudessa ole havaittavissa minkäänlaista leikkauslujuuden kasvua. Päinvastoin leikkauslujuus jopa pienenee syvemmälle mentäessä. Samaan aikaan painokairauksessa on siirrytty kierron puolelle, mikä maan jäykkyyden kasvua ja mahdollisesti kasvavaa lujuuksia. Kitkakulman avulla määritettävä leikkauslujuuden arvo ei ole yksiselitteinen, suljettu leikkauslu-

juus on riippuvainen leikkaussuunnasta. Tässä esimerkissä on käytetty aktiivitalan maksimileikkauslujuutta, tai sen aproksimaatiota.

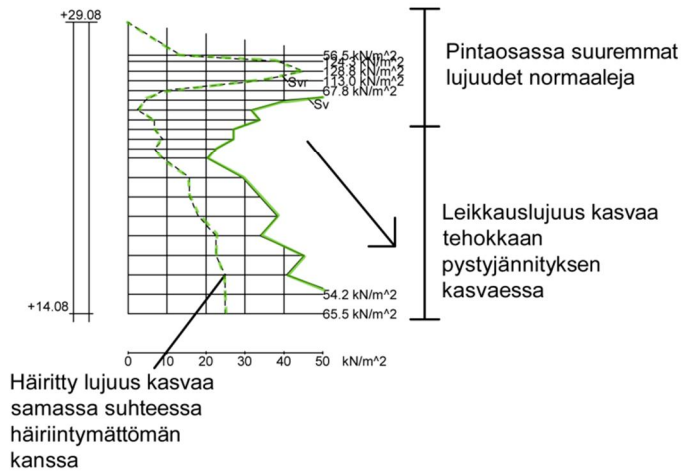


Kuva 5.16. Pohjatutkimusten vastaavuus suljetun leikkauslujuuden määrittämisessä

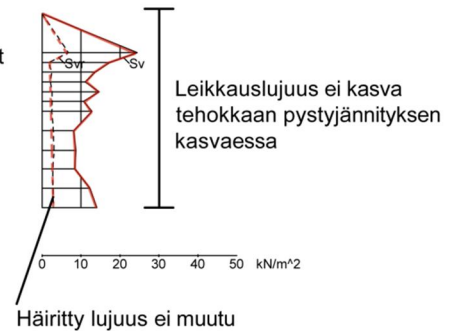
Siipikairauksen onnistumista voidaan arvioida kairausdiagrammista. Koska maan leikkauslujuus on riippuvainen siihen vaikuttaneesta jännitystilasta, tulisi sen ainakin josain määrin kasvaa syvemmälle maahan mentäessä. Mikäli siipikairausdiagrammissa ei ole havaittavissa minkäänlaista muutosta, tai jopa lujuuden pientymistä tulisi tuloksia käyttää harkiten. Saman savikerroksen lujuus ei paksulla tasaisella savikolla voi pienentyä syvemmälle mentäessä, ellei tilanteeseen vaikuta paineellinen pohjavesi.

Pirttirannassa siipikairauksia on tehty jokitörmältä ja kauempaa joesta. Esimerkki on esitetty kuvassa 5.17. Molemmat kairaukset on tehty samalla menetelmällä mutta jokitörmältä tehty kairaus tuottaa suuremman leikkauslujuuden. Tuloksiin voi myös vaikuttaa se, että mahdollisesti jokipenkereen lujittumisen johdosta savi penkereen alueella ole niin häiriintymisherkkää.

Tehokkaan pystyjännityksen kasvua korreloiva siipikairatulos



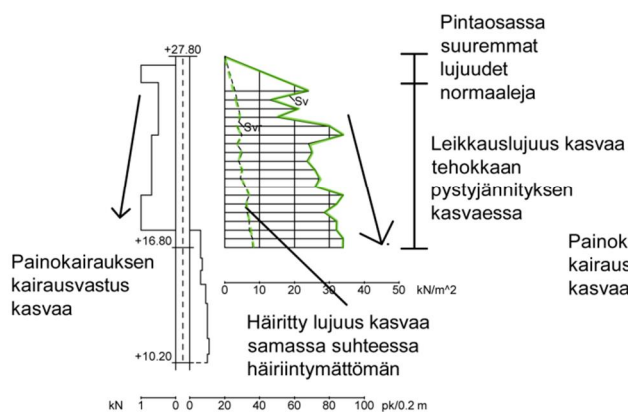
Siipikairatulos, jossa tehokkaan pystyjännityksen kasvua ei ole nähtävissä



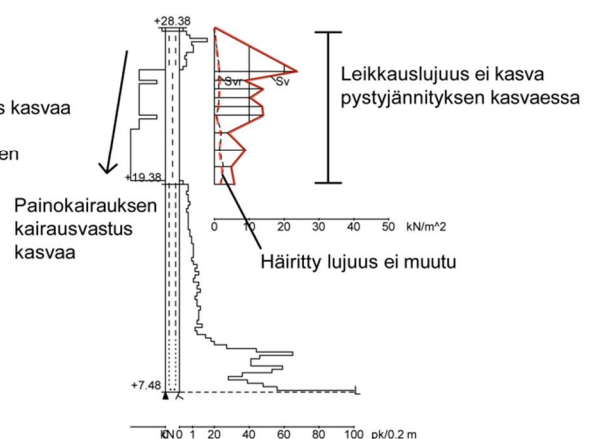
Kuva 5.17. Tehokkaan pystyjännityksen kasvua korreloivan siipikairauksen ja siipikairauksen, jossa lujuuden kasvua tehokkaan pystyjännityksen suhteessa ei ole havaittavissa ominaispiirteitä Pirttirannan kohteessa.

Vallinojan kohteelta on olemassa olevia siipikairaustuloksia vuodelta 1967 ja sen lisäksi tämän työn yhteydessä tehtyjä siipikairaustuloksia. Vuoden 1967 siipikairaukset on tehty manuaalisesti suojaputkea käyttäen puolen metrin välein. Tämän työn yhteydessä tehdyt kairaukset on tehty sähköisellä suojaputkettomalla Nilcon- tyyppisellä siipikairalla. Näiden kahdella eri menetelmällä tehtyjen kairausten tulokset on esitetty kuvassa 5.18.

Tehokkaan pystyjännityksen kasvua korreloiva siipikairatulos



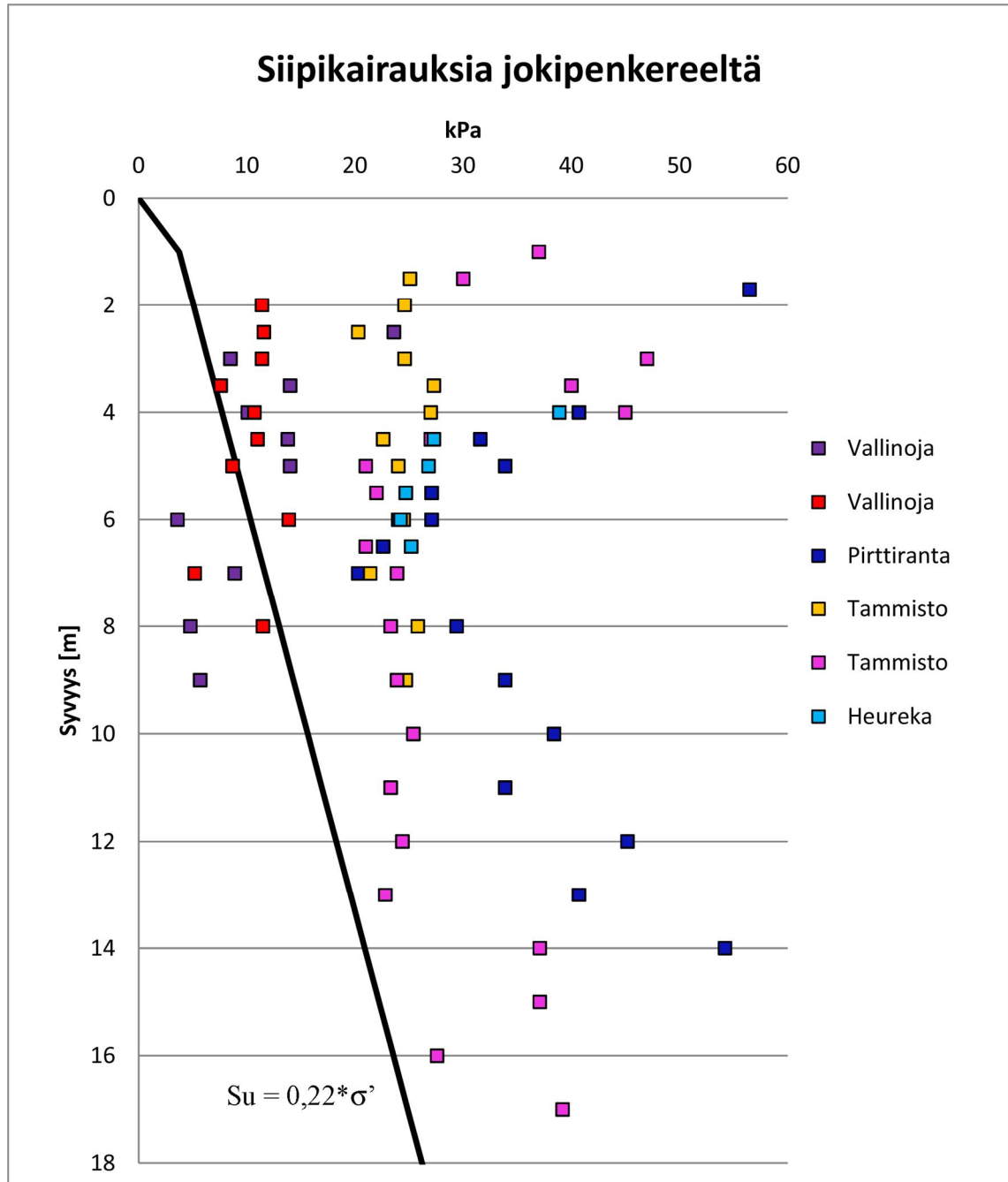
Siipikairatulos, jossa tehokkaan pystyjännityksen kasvua ei ole nähtävissä



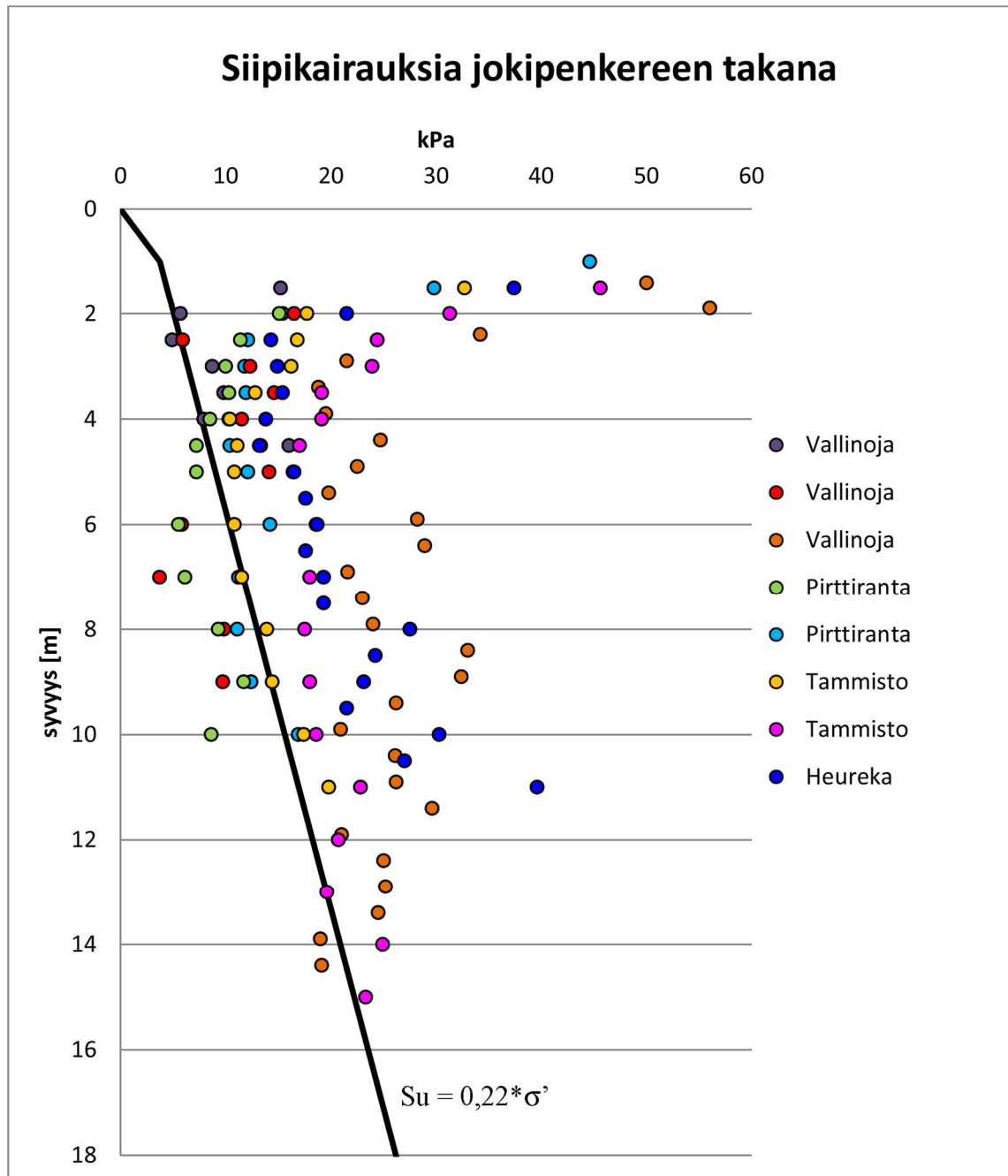
Kuva 5.18. Onnistuneen ja epäonnistuneen siipikairauksen ominaispiirteitä Vallinojan kohteessa.

Eri kohteilta tehtyjä siipikairatuloksia jokipenkereeltä tai jokipenkereen välittömästä läheisyydestä on esitetty kuvissa 5.19 ja 5.20. Kuvista voidaan havaita jokipenkereellä

paikoin hyvinkin suuria suljetun leikkauslujuuden arvoja. Kauempaa joesta tehtyjen kairausten tulokset korreloivat jossain määrin kasvavaa tehokasta jännitystä.

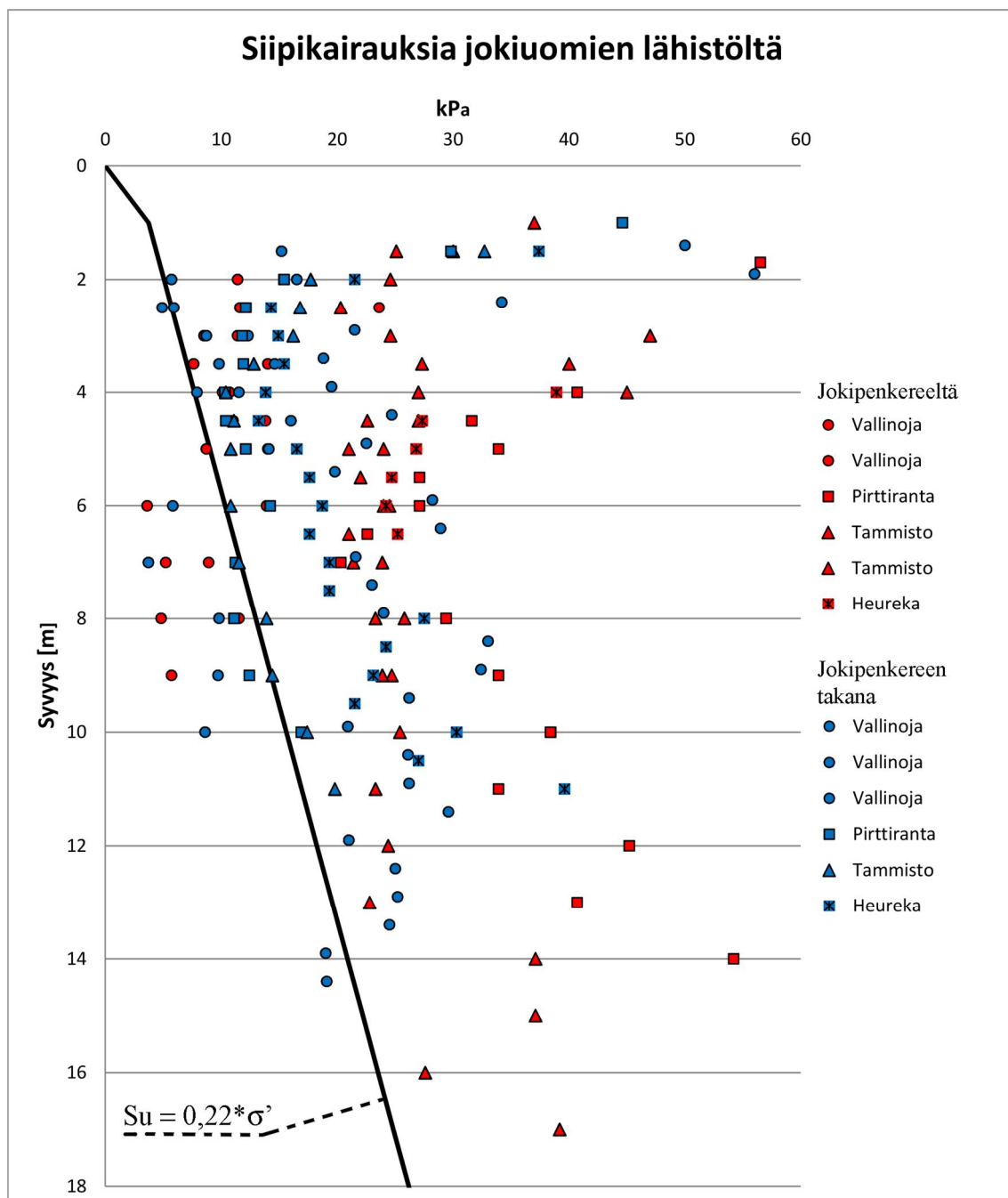


Kuva 5.19. Siipikairaustuloksia jokipenkereeltä



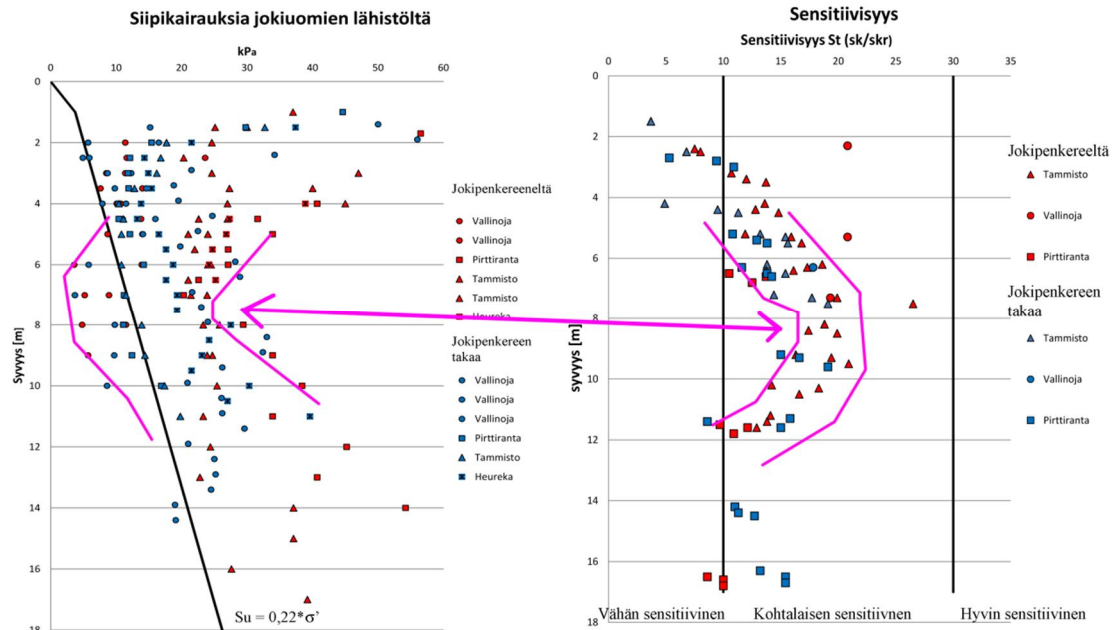
Kuva 5.20. Siipikairaustuloksia jokipenkereen takaa tehdyistä tutkimuksista.

Esimerkeissä esitetyt maan leikkauslujuuden pudotukset ovat suunnittelutyön kannalta merkittäviä. Mikäli maan leikkauslujuudeksi otaksutaan alle puolet todellisesta lujuudesta, päädytään tekemään tarpeettoman suuria vahvistustoimenpiteitä tai rajoittamaan rakentamista tarpeettomasti. Tärkeää on myös erottaa milloin siipikairauksin määritetty lujuus on virheellinen maan häiriintymisen johdosta ja milloin tutkittu maa on todellisuudessa pehmeää.



Kuva 5.21. Siipikairaustuloksia jokipenkereeltä ja jokipenkereen takaa, kauempaa joesta.

Siipikairaustuloksista voidaan havaita suljetun leikkauslujuuden olevan jokipenkereellä keskimäärin suurempia kuin kauempaa joesta tehdyissä pisteissä. Kuvassa 5.21. punaiset pisteet ovat yleisesti enemmän oikealla kuin siniset pisteet. Myös konsolidaatiojännitykset ovat jokipenkereellä yleisesti hieman suurempia, kuten kuvassa 5.13 nähtiin. Tuloksista voidaan havaita jossain määrin suljetun leikkauslujuuden aleneminen n. 8 metri syvyydellä. Jos tuloksia vertaa samoista kohteista tehtyihin kartiokokeen yhteydessä määritettyihin sensitiivisyyden arvoihin, voidaan havaita saven häiriintymisherkyyteen viittaava yhteys. Samalla syvyystasolla on saven sensitiivisyyksissä havaittava selkeä kasvu. Tilanne on esitetty kuvassa 5.22.



Kuva 5.22. Siipikairauksen ja sensitiivisyyden vastaavuus.

Ottaen huomioon, että verrattava aineisto on suhteellisen suppea ja kohteet vaihtelevia, on kuitenkin mahdollista huomata selvä korrelaatio sensitiivisyyden kasvun ja siipikairatulosten välillä. Vaikka sensitiivisyyden tulisi vaikuttaa vasta siipikairalla määritettävään häirityn tilan suljetun leikkauslujuuden arvoon, on se nähtävissä myös häiriintymättömien leikkauslujuuksien arvoissa. Tämä edelleen vahvistaa olettamusta siitä, että siipikairalla leikkauslujuuksia määritettäessä päädytään väistämättä jossain määrin häiritsemään tutkittavaa savikerrosta.

Siipikairauksella määritettyä suljetun leikkauslujuuden arvoa tulisi redusoida kartiokokeella määritetyn hienousluvun F avulla. Mikäli hienousluku F on pienempi kuin 50, käytetään redusointikertoimenä arvoa 1, eli siipikairauksella määritettyä suljetua leikkauslujuutta sellaisenaan. Redusointikerroin määritetään kaavan 5.1 avulla./29/

$$\mu = \frac{1,5}{1 + F/100} \quad (5.1)$$

μ = redusointikerroin

F = kartiokokeella määritetty saven hienousluku

Mitä tahansa 1 pienempää redusointikerrointa käytettäessä pienennetään siipikairauksella määritettyä suljetun leikkauslujuuden arvoa entisestään. Koska kohteilla havaittiin epäuskottavan pieniä siipikairauslujuuksia jo ennen tulosten redusointia, on redusointikertoimenä kohteilla käytetty arvoa 1. Käytännössä redusointia ei siis ole tehty. Kunkin kohteen tutkimustulosten esittelyn yhteydessä on kuitenkin mainittu mikä olisi sopiva redusointikerroin, mikäli sitä haluttaisiin käyttää.

5.3.5 Kolmiaksiaalikokeet

Kolmiaksiaalikokeita tehtiin kahdella kohteella yhteensä kolmesta pisteestä. Lisäksi käytössä on ollut Pirttirannasta tehdyn näytenpisteiden tuloksia. Kaikki tehdyt kokeet on tehty valitsemalla käytettävä sellipaine samasta pisteestä ja samalta syvyydeltä tehtyjen ödometrikokeiden perusteella. Tällöin varmistetaan että koe tehdään nimenomaan saven normaalikonsolidoituneelta jännitysalueelta. Koska ödometrikokeet osoittivat savikerroksen olevan ainakin jossain määrin ylikonsolidoitunutta, oli konsolidaatiojännitysten määrittäminen ennen kokeiden aloitusta tarvittava toimenpide.

Tässä työssä kolmiaksiaalikoetuloksia on esitetty p'-q- koordinaatistoissa jännityspolkukuvaajina. Jännityspolkukuvaajien perusteella kuvaajaan on piirretty mahdollisimman tarkka murtosuoran sovitus sekä kriittisen tilan murtosuoran sovitus, kriittisen tilan tarkastelussa koheesio pakotetaan nolllaksi. Murtosuorasovitususten avulla voidaan määrittää tutkittavan maalajin tehokkaat parametrit seuraavia kaavoja käyttäen: /16/.

murtosuoran kaltevuuskulman k_1 ja tehokkaan kitkakulman φ' välillä vallitsee yhteys:

$$\sin \varphi' = \frac{3k_1}{6 + k_1} \quad (5.2)$$

murtosuoran ja $p'=0$ leikkauskohdan arvon q_0 ja koheesio- välillä on yhteys:

$$c' = \frac{3 - \sin \varphi'}{6 \cos \varphi'} q_0 \quad (5.3)$$

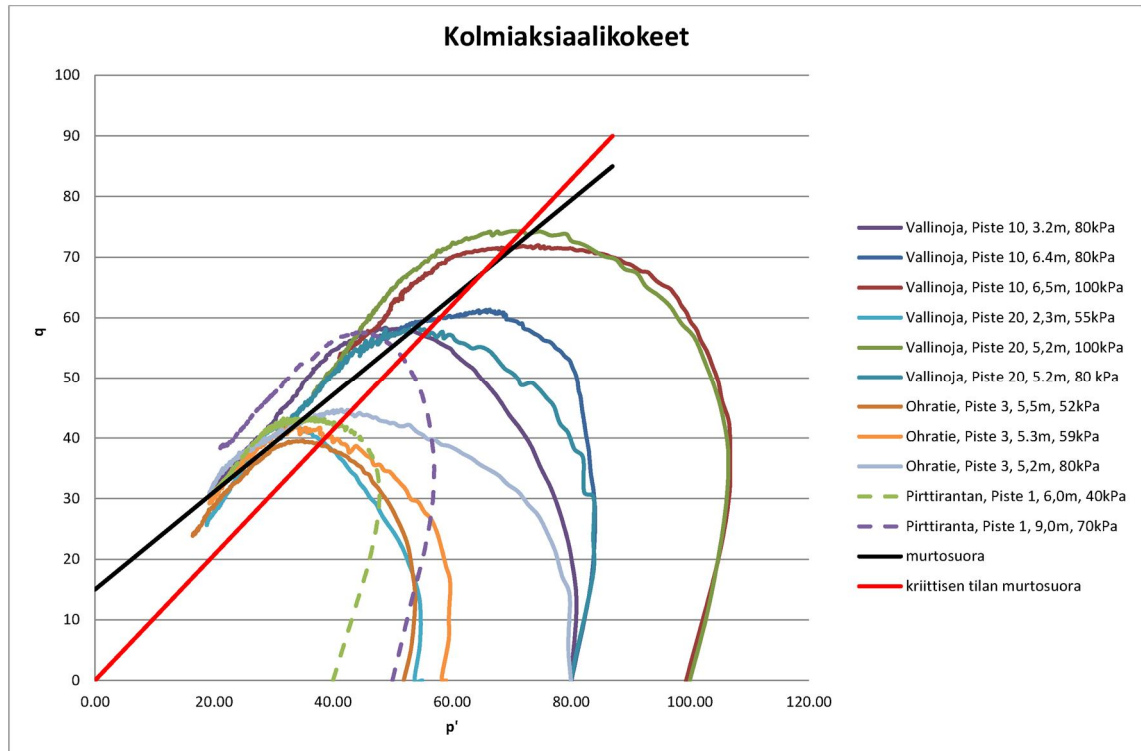
Kriittisen tilan tarkasteluissa koheesio arvo otaksutaan nolllaksi jolloin murtosuoran alkupiste sijaitsee p'-q- koordinaatistossa origossa. Kriittisen tilan kitkakulman arvon φ_c ja kriittisen tilan murtosuoran kulmakertoimen M välinen yhteys:

$$\sin \varphi_c = \frac{3M}{6 + M} \quad (5.4)$$

lepopaine kerroin K_0 on riippuvainen kitkakulman arvosta:

$$K_0 = 1 - \sin \varphi_c \quad (5.5)$$

Tehdyt kolmiaksiaalikokeet onnistuivat varsin hyvin. Tulokset tukevat oletusta, että jokilaakson savikot ovat kutakuinkin samaa savikkoa. Eripuolilta tehdyt kolmiaksiaalikokeiden tulokset yhdistettynä samaan p'-q'- kuvaajaan, tulokset on esitetty kuvassa 5.23.



Kuva 5.23. Tehtyjen kolmiakselialikokeiden tuloksia kerättynä samaan p' - q' -kuvaajaan.

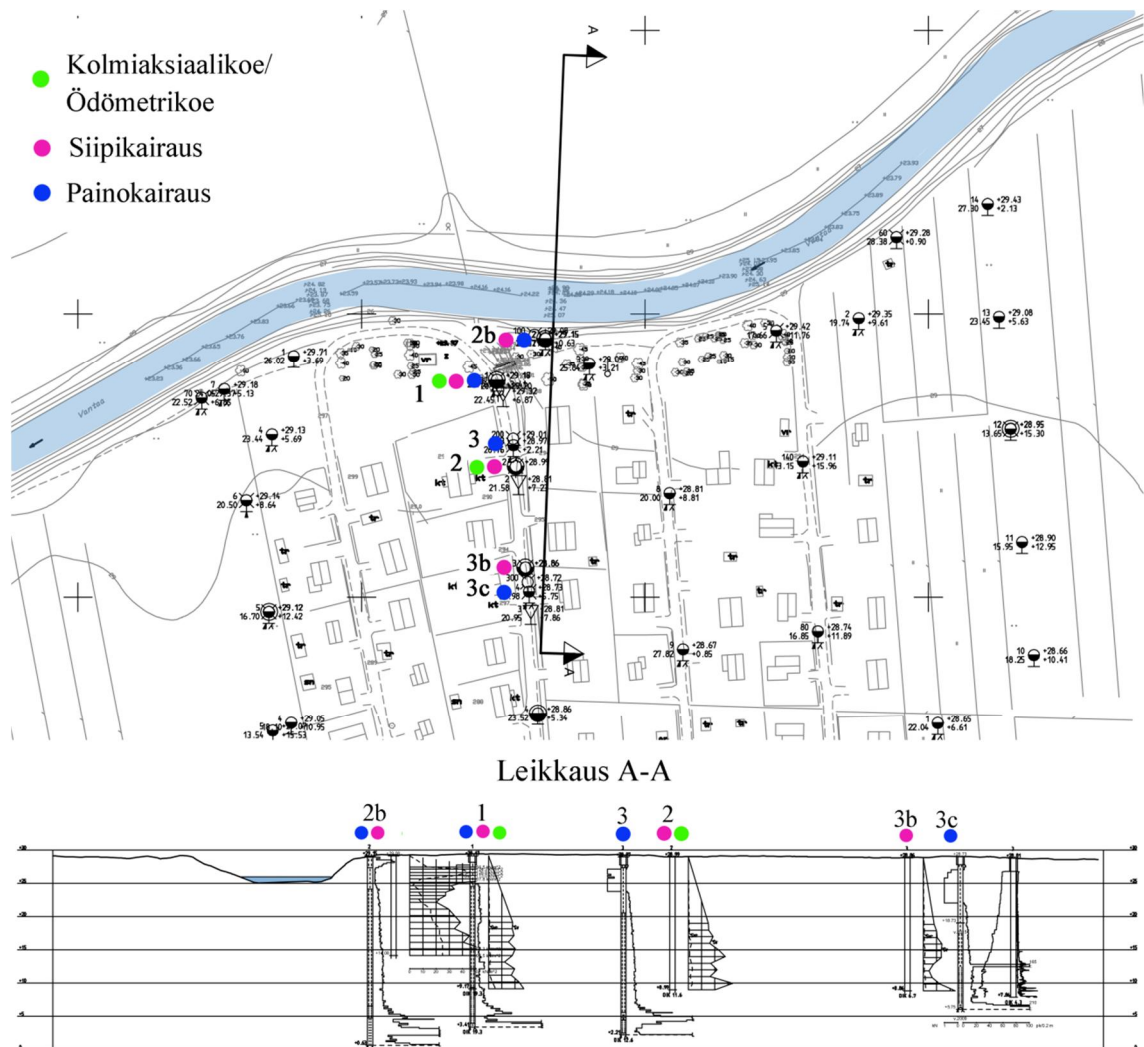
Kuvassa 5.23 esitetyt jännityspolkukuvaajat korreloivat varsin hyvin keskenään. Kuten kuvasta nähdään, asettuvat jännityspolkukuvaajien huiput melko hyvin määritetyille murtosuorille. Kuvaan määritetty sekä murtosuora että kriittisen tilan murtosuora, nämä kuvaavat siis tehtyjen kokeiden perusteella savikon keskimääräisiä murtosuoria. Koheesion huomioonottava musta murtosuora antaa koheesiolle arvon $c'=7$ ja kitkakulmalle $\phi'=21^\circ$. Kriittisen tilan murtosuorasta määritetty tehokas kitkakulma $\phi_c'=26^\circ$, tällöin koheesio jätetään huomioimatta ja asetetaan $c'=0$. Koska koheesion määrittäminen osittain näennäisvoimana on epävarma ja vaikeasti määritettävää, on tässä työssä käytetty kriittisen tilan parametreja.

6 TUTKIMUSTULOKSET TUTKIMUSKOHTEITTAIN

6.1 Pirttiranta

6.1.1 Tehdyt tutkimukset

Pirttirannan kohteesta on tulvasuojeluhankkeen yhteydessä tehty pohjatutkimuksia vuonna 2010. Tuolloin pohjatutkimuksia on tehty tulvalta suojaavan padon rakentamista varten.



Kuva 6.1. Pirttirannalla tehdyt tutkimukset ja tarkasteltava leikkaus A-A kartalla.

Alueella on tehty painokairauksia, siipikairauksia ja otettu kahdesta pisteestä häiriintymättömiä näytteitä laboratoriokokeita varten. Laboratoriossa näytteistä on tehty sekä ödometri- ja kolmiaksiaalikokeita.

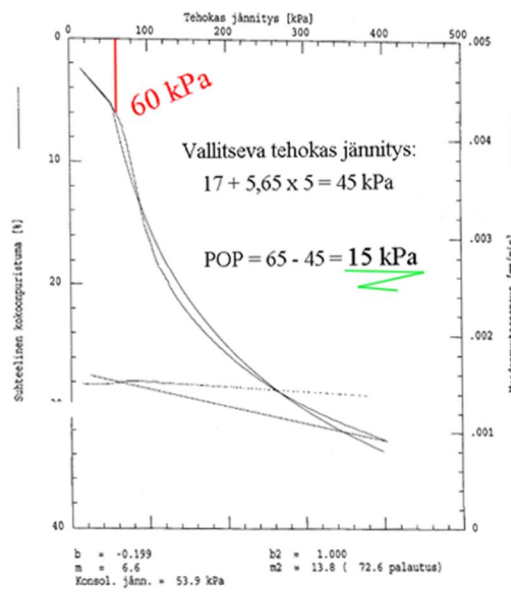
Kolmiaksiaalikokeita on tehty yhteensä 13 kpl neljältä eri syvyydeltä. Kolmiaksiaalikokeet on tehty Aalto-yliopistolla ja niistä on laboratorion toimesta määritetty laskelmissa käytettävät materiaaliparametrit. Tuloksia on analysoitu uudelleen myös tämän työn yhteydessä.

6.1.2 Tutkimustulokset ja laskentaparametrit

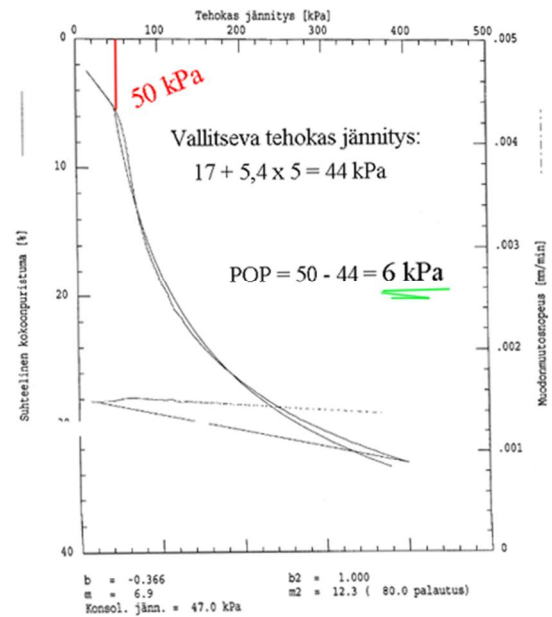
Ödometrikokeet

Ödometrikokeita on Pirttirannan kohteella tehty kahdesta tutkimuspisteestä. Pisteet sijaitsevat 20 m ja 50 m etäisyydellä joesta. Jokea lähemmän pisteen sijainti on hieman liian kaukana joesta, jotta edellä esitettyjen syiden johdosta tapahtuva jokipenkereen lujittuminen olisi havaittavissa. Tarkkaa rajaa jokipenkereen lujittumiselle ei kuitenkaan voida vetää ja 20 metrin etäisyydellä voidaan odottaa jonkinasteista ylikonsolidoitumista havaittavan.

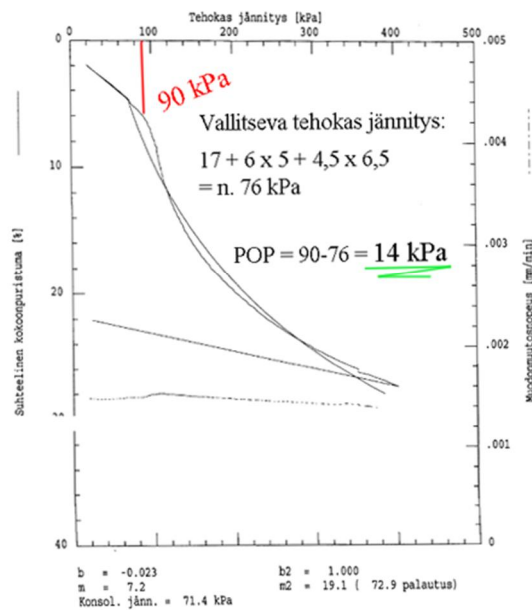
Piste 1, h= 6,65m



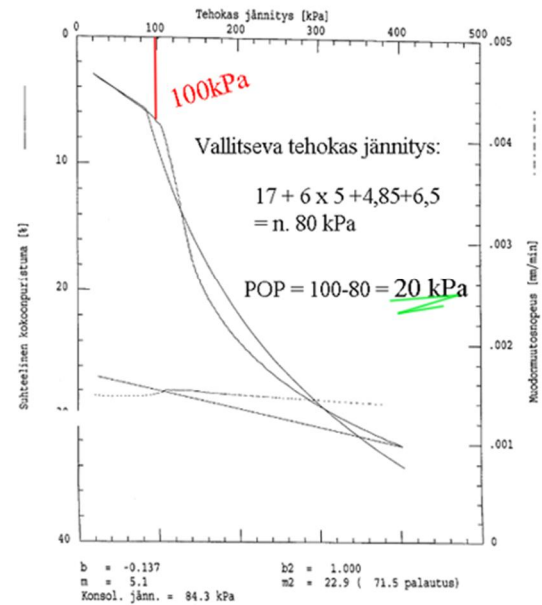
Piste 2, h= 6,40m



Piste 1, h= 11.85m



Piste 2, h=11,45m

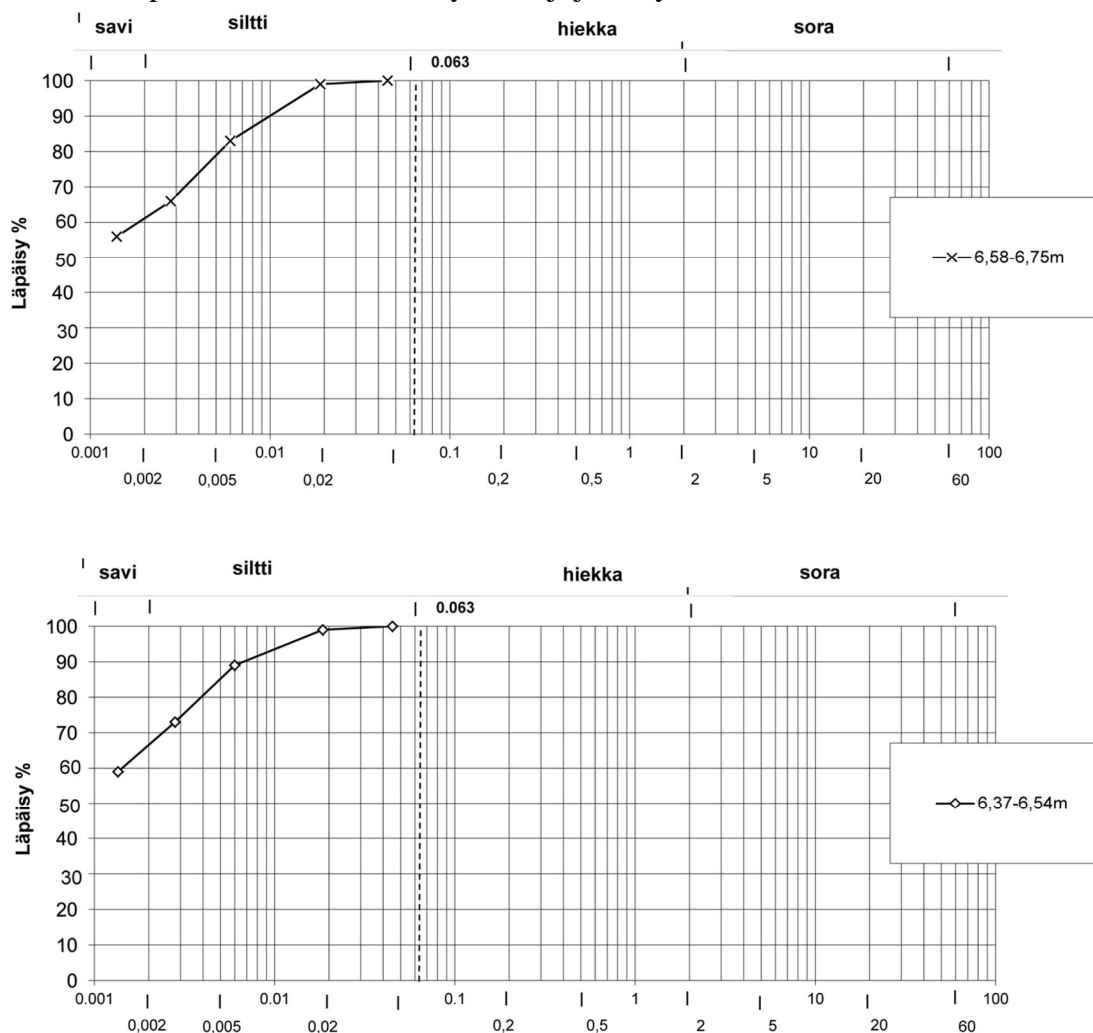


Kuva 6.2. Pirttirannasta tehtyjen ödometrikokeiden tulokset tutkimuspisteestä 1 ja 2. Pisteen 1. etäisyys joesta 20 m ja pisteen 2 etäisyys 50 m

Ödometrikokeissa automaattiset sovitukset ovat varsin huonoja joten konsolidaatiojännitys on määritetty kussakin tapauksessa uudestaan.

Rakeisuus

Rakeisuudet on määritetty samoista näytepisteistä, joista ödometrikokeet on tehty. Rakeisuuksien perusteella on määritetty maalaji ja tehty indeksikokeita.



Kuva 6.3. Tutkimuspisteestä 1 ja 2 tehdyt rakeisuuden määritykset n. 6,5 m syvyydestä.

Kuten kuvassa 6.3 esitetyistä rakeisuuskäyristä voidaan havaita, ei koepisteiden kohdalla maanäytteen rakeisuuksissa ole havaittavissa eroja. Molempien näytteiden perusteella maalaji määräytyy lihavaksi saveksi. Taulukossa 6.1. on esitetty myös muita indeksiominaisuuksia joita näytepisteen maanäytteistä on määritetty.

Taulukko 6.1 Pirttirannan tutkimuspisteiden 1 ja 2 maanäytteistä tutkitut ominaisuudet.

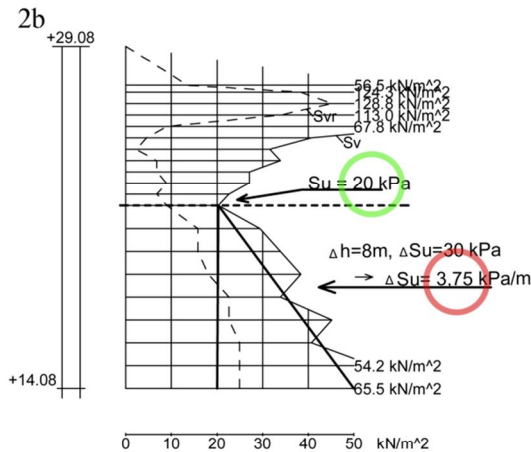
	PISTE 1		PISTE 2	
näyte tunnus	b	c	c	a
laboratorio n:o	11838	11843	11861	11867
syvyys m	6.85 - 6.75	11.75 - 11.92	6.37 - 6.54	11.37 - 11.54
vesipitoisuus %	82.9	46.9	80.5	72.2
hienousluku F	77.9	46.9	71.6	78.6
leikkauslujuus sk	18.8	19.3	14.9	22.7
leikkauslujuus skr	1.37	1.77	1.08	2.65
sensitiivisyys St	13.7	10.9	13.8	8.6
lujuusluku H1	7.55	10.0	5.90	15.1
märkätilavuuspaino kN/m ³	15.4	16.5	15.2	15.8
humus %	0.6			
painumakoe	x	x	x	x
maalaji: tutkittu	liSa	liSa	liSa	liSa

Laboratoriotutkimuksista nähdään pisteen 1 syvemmän näytteen poikkeavan muista näytteistä. Tutkimustuloksissa on ilmoitettu savikerroksissa olleen paikoittain kerrallisen siltin kerroksia. Tämä voi selittää osittain matalaa vesipitoisuutta lihavaksi saveksi nimetyssä kerroksessa. Indeksikokeiden perusteella voida todeta maaperän olevan kerrallista, sillä läheltä toisistaan otetuissa näytteistä on saatu risteäviä tuloksia

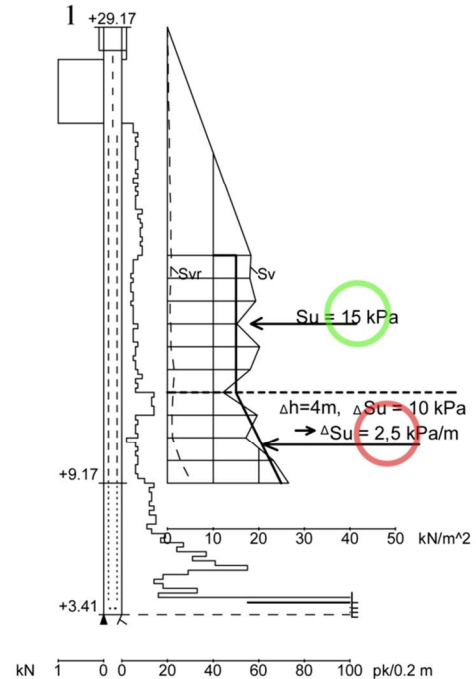
Paino- ja siipikairaukset

Siipikairauksia Pirttirannan tutkittavassa leikkauksessa on tehty kolme kappaletta. Siipikairauksissa on havaittavissa jokipenkereen lujittuminen. Siipikairaustulokset ovat joen penkereellä selvästi parempia kuin kauempana joesta. Alueella on myös aikaisempien havaintojen perusteella ilmeisesti paineellista pohjavettä savikerroksen alapuolella vettä läpäisevissä kerroksissa. Tämä voi osaltaan selittää pienet siipikairalujuudet savi-kerroksen alaosassa.

Siipikairalla määritetty leikkauslujuus
4,5m etäisyydeltä joesta



Siipikairalla määritetty leikkauslujuus
20m etäisyydeltä joesta



Kuva 6.4. Pirttirannan kohteesta tehtyjen paino- ja siipikairauksen diagrammit, sekä periaate siipikairatuloksen tulkinnasta

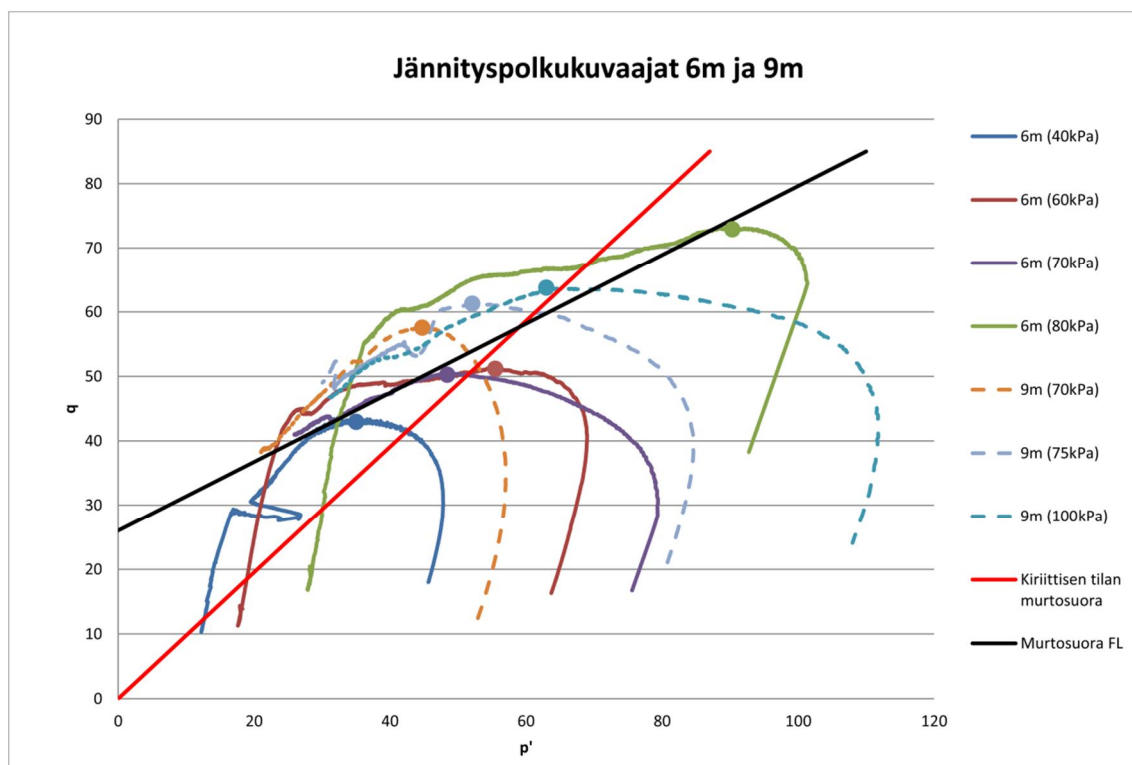
Koska jokipenkereeltä ei häiriintymättömiä näytteitä ole otettu, ei jokitörmältä määritettyä suljetun leikkauslujuuden arvoa voida verrata vastaan kohdan kartiokokeen tulokseen. Kauempana jokitörmästä, pisteen 2 osalta siipikairalla ja kartiokokeella määritetyt suljetun leikkauslujuuden arvot vastaavat kutakuinkin toisiaan.

Laskelmissa käytetyt siipikairauksella määritetyt suljetun leikkauslujuuden arvot ovat redusoimattomia. Mikäli tuloksia halutaan redusoida, olisi sopiva redusointikerroin kartiokokeella määritetyn hienousluvun perusteella n.0.9.

Kolmiaksaalikokeet

Kolmiaksaalikokeita on Pirttirannan kohteella tehty kolmesta syvyydestä: 6m, 9m ja 15m. 15 metrin koetulokset ovat ilmeisesti näytteen huonon laadun vuoksi olleet niin epätasaisia, ettei niitä ole huomioitu parametrien määrittämisessä. Kitkakulma on määritetty kahdelta syvyydeltä tehtyjen kokeiden perusteella. Kuuden metrin syvyydeltä otetusta näytteestä on tehty kokeet neljällä eri sellipaineella; 40, 60, 70 ja 80 kPa. 6 metrin syvyydellä ominaispainosta määritetty vallitseva jännitys on n. 45kPa ja ödometrikokeella määritetty konsolidaatiojännitys on n. 60 kPa. 9 metrin syvyydeltä otetusta näytteestä kokeet on tehty 70, 75 ja 100 kPa sellipaineita. Vallitsevat jännitykset syvyydellä on noin 66 kPa mutta ödometrikokeita ei tältä syvyydeltä ole tehty. Kolme metriä matalammalta ja syvemmmältä tehdyt ödometrikokeet kuitenkin osoittavat, että syvyysvälillä esikonsolidaatiojännitykset olisivat 15-20 kPa vallitsevia jännityksiä suurempia. Tämän

vuoksi 100 kPa sellipaineella tehty koe on tehty hieman tarpeettoman suurella sellipaineella.



Kuva 6.5. Pirttirannan savikerroksista otettujen maanäytteiden jännityspolkukuvaajat p' - q -koordinaatistossa.

Samasta maakerroksesta otettujen maanäytteiden tulosten tulisi tehokkaiden laskentaparametrien osalta vastata toisiaan näytteenottosyvyydestä huolimatta. Kun tarkastellaan kuvassa 6.5 esitettyjä jännityspolkukuvaajia, huomataan, ettei murtosuorien sovitus ole kovinkaan tarkka. Tämä indikoi koetulosten epätarkkuudesta. Epätarkkuudet voivat johtua häiriintyneistä näytteistä, koejärjestelyissä tapahtuneissa epätarkkuuksista tai maan kerroksellisuudesta. Taulukossa 6.2 on esitetty kuvan 6.5 murtosuorista määritetyt tehokkaat laskentaparametrit, jotka on määritetty kaavoilla 5.1...5.4. Huokospaineparametri r_u' on määritetty kitkakulman avulla kuvan 4.8. taulukosta.

Taulukko 6.2. Kolmiaksaalikokeesta ja määritetyt maaparametrit Pirttirannan savikerrokselle.

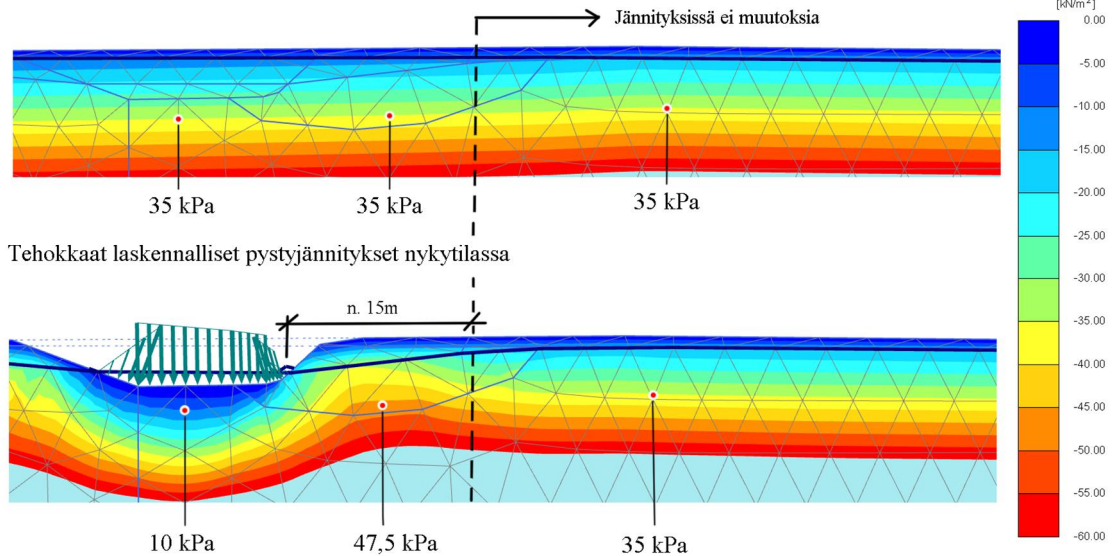
q_0	k_1	M	c'	ϕ'	ϕ_c	K_0	r_u'
26	0,54	0,97	12,2	14,2	24,8	0,58	0,21

Jokipenkereen lujittuminen

Pirttirannassa osalta aiemmin työssä käsiteltyä joen lujittumista on mallinnettu Plaxis-ohjelmalla. Ohjelmassa on mallinnettu joen muodostumisen aiheuttamaa lujittumista luvun 5.2.2. mukaisesti. Pirttirannassa tutkitun poikkileikkauksen geometria on siinä mielessä poikkeuksellinen, että tutkitavan alueen kohdalla maan pinta laskee jokipen-

kereen jälkeen pois päin joesta. Tällöin pitkät liukupinnat eivät tule vaarallisimmiksi vaan vaarallisinta liukupintaa on perusteltua hakea korkeimman maastonkohdan lähistöltä.

Tehokkaat laskennalliset pystyjännitykset ennen jokiuoman syntymistä



Kuva 6.6. Pirttirannan jokiuoman lujittumisen mallintaminen Plaxis- ohjelmalla.

Pirttirannassa huomataan jyrkässä jokiuomassa tapahtuvien muutosten periaatteet. Jokuoman kohdalla on ennen uoman syntymistä vallinneet samansuuruiset jännitykset yläpuolisen maamassan johdosta kuin ympäristössä. Jokuoman synnyttyä ja maamassan poistuttua jokiuoman pohjan alapuolella jännitykset ovat pienentyneet, eli jokiuoman alla maa on ylikonsolidoitunutta. Jokipenkalla joen synty on vaikuttanut pohjaveden alenemiseen. Vaikka pohjaveden pinta onkin riippuvainen joenpinnan tasosta, on joessa kuluneiden vuosituhanten aikana ollut myös kuivempia kausia, jolloin pohjavesi on ollut alempana pidempiä jaksoja. Koska nykytila on vällinnut jokipenkalla jo useamman tuhannen vuoden, voidaan maata pitää jokipenkereellä ylikonsolidoituneena.

Joien syntymästä aiheutuva ylikonsolidoituminen ei kuitenkaan selitä kokonaisuudessaan jokipenkereen siipikairauksilla osoitettuja suljetun leikkauslujuuden eroa. Jos tehokkailla vallitsevilla jännityksillä ja maan kitkakulmalla määritetään maan leikkauslujuutta kaavan 4.2. mukaisesti, voidaan karkeasti arvioida leikkauslujuuden kasvavan noin neljäsosan vallitsevan tehokkaan jännityksen kasvusta. Lujittumiseen vaikuttava kapillaarinen imuvoima voidaan siis otaksua hyvinkin merkittäväksi lujituksen kasvattajaksi. Paljon epävarmuutta luovat myös siipikairaustulokset. Todella pehmeiden kairapisteiden tuloksia tulee tarkastella kriittisesti. Todennäköisesti todellinen leikkauslujuuksien ero ei ole todellisuudessa niin suuri kuin siipikairaustulokset antavat ymmärtää. Kairauspisteissä savi on ainakin jossain määrin häiriintynyt, mikä heikentää siipikairalujuuksia.

6.2 Case Ohratie

6.2.1 Tehdyt tutkimukset

Ohratien sortumakohteella tehtiin sortuman jälkeen pohjatutkimuksia sortuman analysointia varten. Olemassa olevaa pohjatutkimustietoa on rajallisesti ja tutkimukset rajoittuvat lähinnä painokairauksiin. Sortuman jälkeen kohteella on tehty kolme tutkimuspistettä joista on tehty paino- ja siipikairauksia, sekä yhdestä pisteestä otettu häiriintymätön näyte.

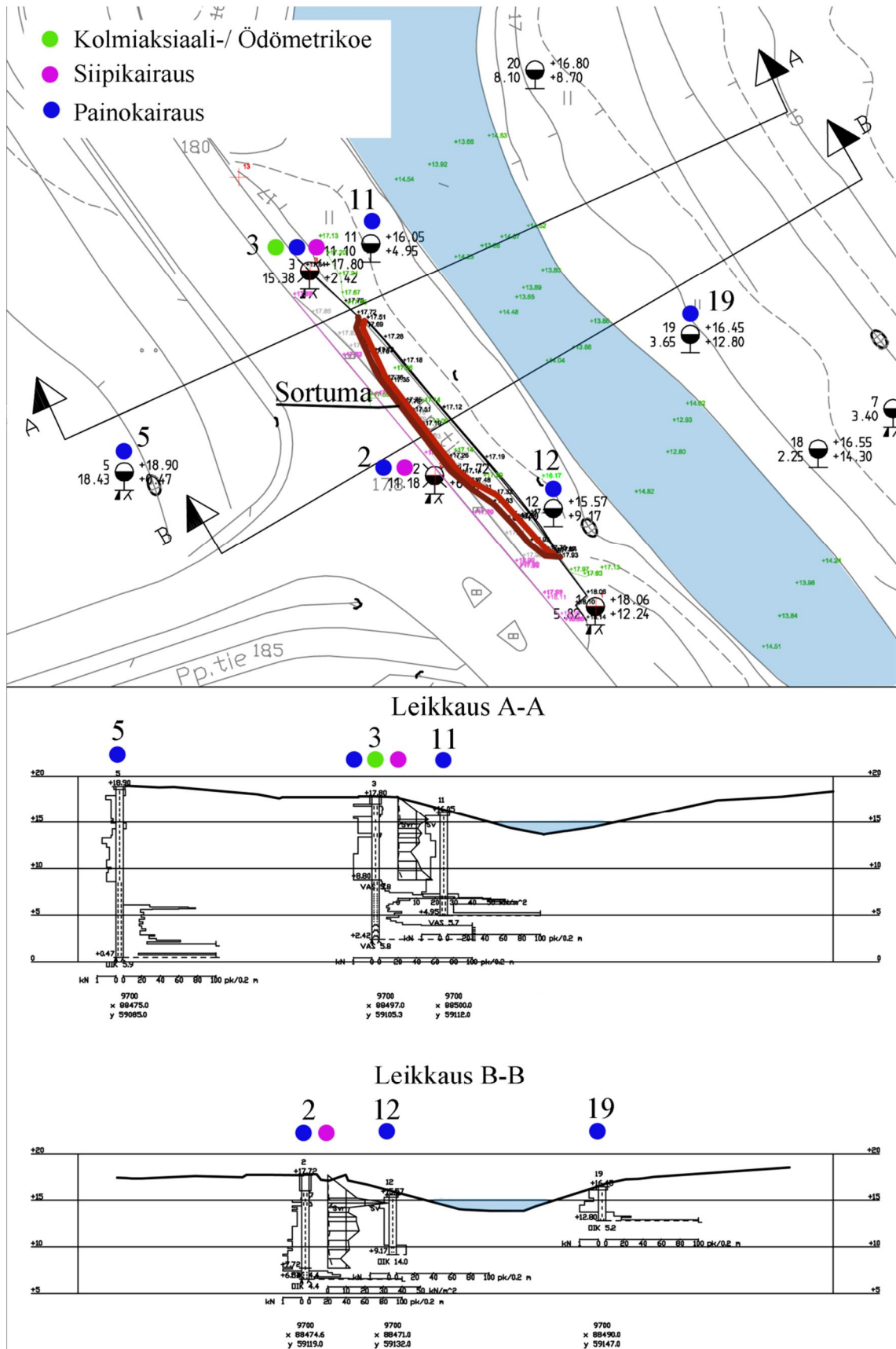
Ohratiellä on myös sortuman jälkeiset siirtymät mitattu heti sortuman tapahtutua, sekä seurattu mahdollisia muutoksia tapahtuman jälkeen. Sortuman yhteydessä syntynyt kynnys sortuman yläpäässä on esitetty kuvassa 6.7.

Laboratoriotutkimuksista nähdään pisteen 1 syvemmän näytteen poikkeavan muista näytteistä. Tutkimustuloksissa on ilmoitettu savikerroksissa olleen paikoittain kerrallisen siltin kerroksia. Tämä voi selittää osittain matalaa vesipitoisuutta lihavaksi saveksi nimetyssä kerroksessa. Indeksikokeet osoittavat savikerroksen kerroksellisuutta.



Kuva 6.7. Sortumaluiskan yläreuna Ohratien sortumapaikalla.

Sortuman kohdalta Keravanjoen uoma on vaaitettu ja vedenpinnan korkeus mitattu. Häiriintymättömästä näytteestä on laboratoriossa tehty kolmiaksiaalikoelä ja ödometri kokeita eri syvyyksiltä. Lisäksi ödometri näytteistä on määritetty rakeisuudet, vesipitoisuus ja tehty kartiokokeita

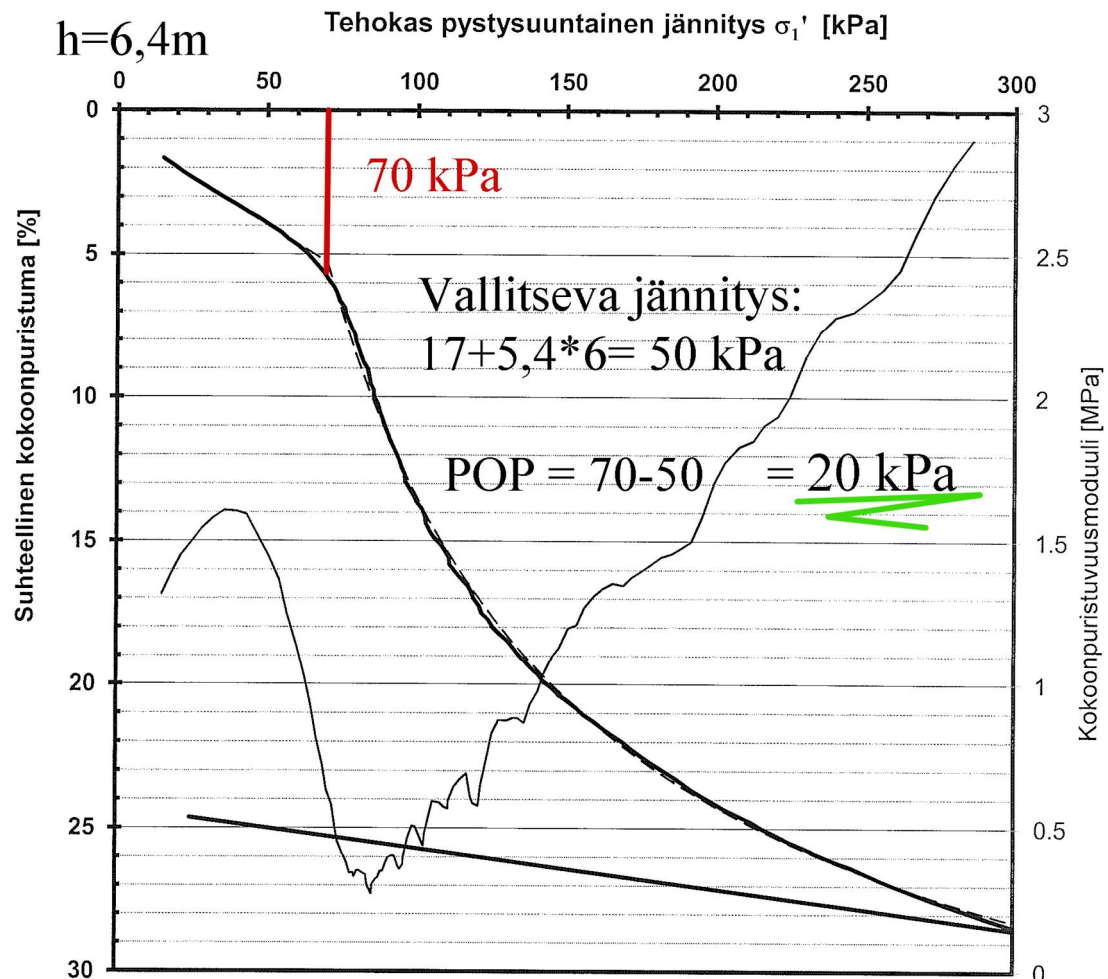


Kuva 6.8. Ohratien pohjatutkimuskartta ja leikkaukset.

6.2.2 Tutkimustulokset ja laskentaparametrit

Ödometrikokeet

Koska kohteella oli tapahtunut sortuma, pyrittiin laboratoriokokeet tekemään maakerroksesta, josta liukupinta on kulkenut. Paino- ja siipikairauksen perusteella arvioitiin millä syvyydellä heikoin maakerros sijaitsee. Lisäksi poikkileikkausta tarkasteltiin arvioiden todennäköisintä liukupinnan sijaintia. Kairausten perusteella näytteistä määritettiin vesipitoisuudet ja tehtiin kartiokokeet kolmelta eri syvyydeltä. Koska näytteiden käsittelyssä havaittiin maa-aineksen muuttuvan selkeästi 6 metrin kohdalla, päädyttiin tekemään vielä kaksi vesipitoisuuden määrittystä. Näillä haluttiin varmistaa onko muutoksessa kysymys vain ohuesta kerroksesta vai ulottuuko muutos laajemmalle. Ödometrikoe on tehty vesipitoisuuksien mukaan pehmeimmästä kerroksesta

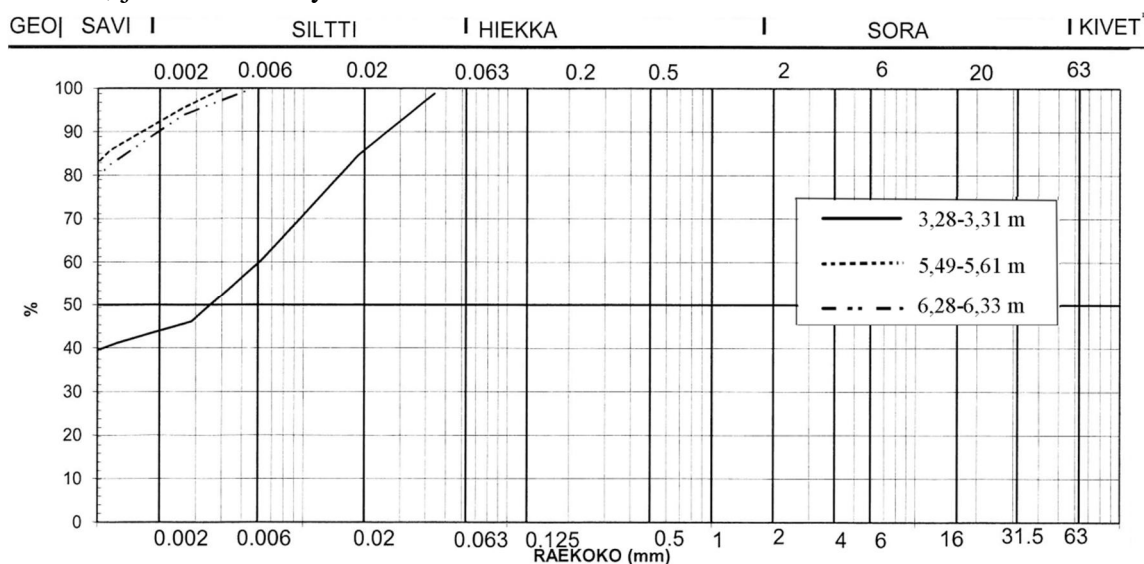


Kuva 6.9. Ohratieltä, sortumakohdan vierestä tehty ödometrikoe 6,4m syvyydeltä.

Ödometrikokeen mukaan jokipenger on ylikonsolidoitunut. Ohratien tapauksessa tien välitön sijainti jokipenkereen päällä on ainakin jossain määrin aiheuttanut penkereen lujittumista.

Rakeisuudet

Rakeisuuden on määritetty kolmelta eri syvyydeltä ja rakeisuuskäyrät on esitetty kuvassa 6.10. Vielä kolmen metrin syvyydessä savi on huomattavan silttistä, 5-6 metrin syvyydellä savi muuttuu hyvin saviseksi, tämä on nähtävissä myös vesipitoisuuksien muutoksena, jotka on esitetty kuvassa 6.10.



Kuva 6.10. Ohratien kohteelta pisteestä 3 määritetyt rakeisuudet.

Pisteestä 3 tehtyjen kartiokokeiden mukaan heikoimmillaan savi on 5,5m syvyydellä, mistä on määritetty suljetun leikkauslujuuden arvoksi 18kPa. 7,5 metrin syvyydestä kartiokokeella määritetty alhainen leikkauslujuus on todennäköisesti seurausta häiriintyneestä näytteestä, sillä rakeisuuksien ja kairauksen perusteella maa-aines on jo selvästi karkeampaa.

Taulukko 6.3. Indeksiominaisuuksia ohratien kohteelta.

	PISTE 3			
näyte tunnus				
laboratorio n:o				
syvyys m	3.28-3.31	5.46-5.49	6.22-6.25	7.46-7.49
vesipitoisuus %	44.2	96.0	51.7	65.3
hienousluku F	47.0	75.0	47.0	54.0
leikkauslujuus sk	25.6	17.9	20.3	15.6
leikkauslujuus skr	2.55	0.55	1.18	0.70
sensitiivisyys St	10.0	32.5	17.2	22.3
lujuusluku H1	14.10	3.1	6.40	3.8
märkätilavuuspaino kN/m ³	18.0	15.8	15.8	14.7
humus %				
painumakoe		x		
maalaji: tutkittu	laSa	Sa	liSa	Sa

Eri menetelmien ja kokeiden yhteydessä määritettyjä vesipitoisuuksia on kerätty taulukoon 6.4. Eri menetelmillä määritetyt vesipitoisuudet eivät ole aina täsmällisesti verrattavissa keskenään, esimerkiksi kartiokokeessa vesipitoisuus voi näytteen häiriintyessä jäädä hieman todellisuutta matalammaksi. Tulokset ovat kuitenkin riittävän tarkkoja antamaan lisätietoa maa-aineksen hienoainespitoisuudesta. Myös yksittäiset poikkeavat tulokset voivat johtua näytteen kohdalle sattuneesta, muusta materiaalista poikkeavasta kerroksesta tai kerrostumasta. Vantaan savissa on yleisesti havaittu monin paikoin kerallisuutta ja ohuita silttikerroksia.

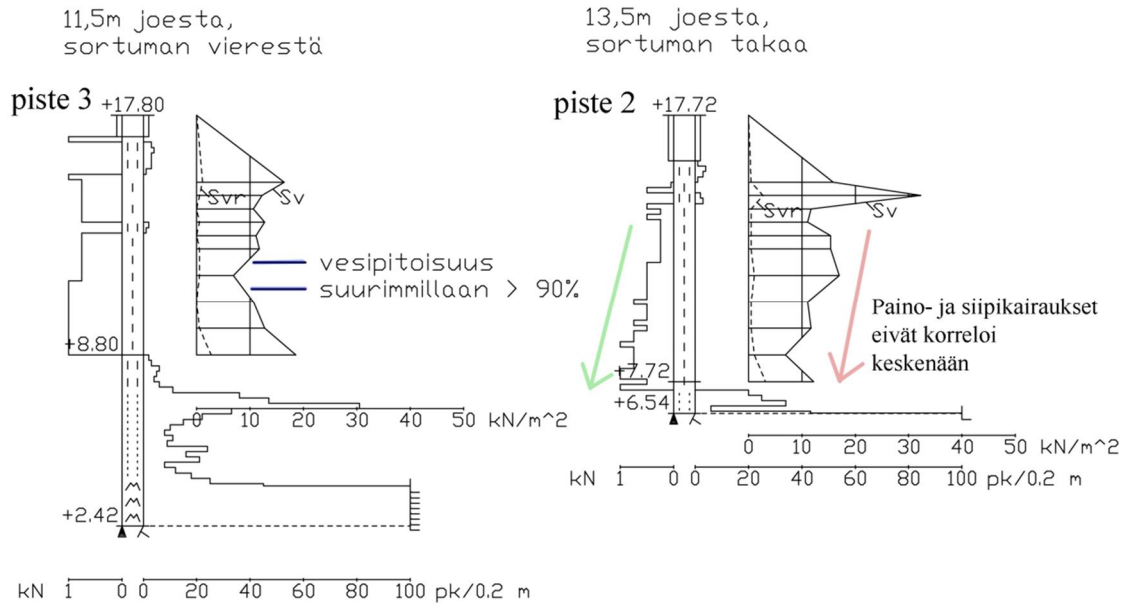
Taulukko 6.4. Ohratieltä tutkimispisteestä 3 määritettyjä vesipitoisuuksia.

syvyys		vesipitoisuus w	määrittystapa
[m]		[%]	
Vesipitoisuuden perusteella pehmein kerros . 5,5-6,5m	3.28	44.0	kartiokoe
	3.31	39.0	ödometrikoe
	4.20	62.0	vesipitoisuuden määrittäminen
	5.28	69.0	ödometrikoe
	5.45	94.3	vesipitoisuuden määrittäminen
	5.48	96.0	kartiokoe
	6.22	51.7	kartiokoe
	6.26	89.5	vesipitoisuuden määrittäminen
	6.32	93.4	ödometrikoe
	7.45	48.0	vesipitoisuuden määrittäminen
	7.47	65.3	kartiokoe

Yhdessä rakeisuuksien, kairaustulosten, kartiokokeiden ja vesipitoisuuksien perusteella heikoimmaksi maakerrokseksi Ohratiellä on arvioitu 5,5-6,5 m syvyydellä oleva savi-kerros. Tämän oletuksen perusteella ödometrikoe on päädytty tekemään kyseiseltä syvyydeltä.

Paino- ja siipikairaukset

Sortuman tapahduttua kohteella tehtiin pohjatutkimuksia kolmesta pisteestä joista tehtiin kustakin painokairaus ja kahdesta lisäksi siipikairaukset. Sortuman vierestä tehdyssä siipikairauksessa on nähtävissä heikompi savikerros, josta myös vesipitoisuudet mitattiin suurimmiksi. Molemmat tehdyt siipikairaukset ja kaksi painokairausta on esitetty kuvassa 6.11.



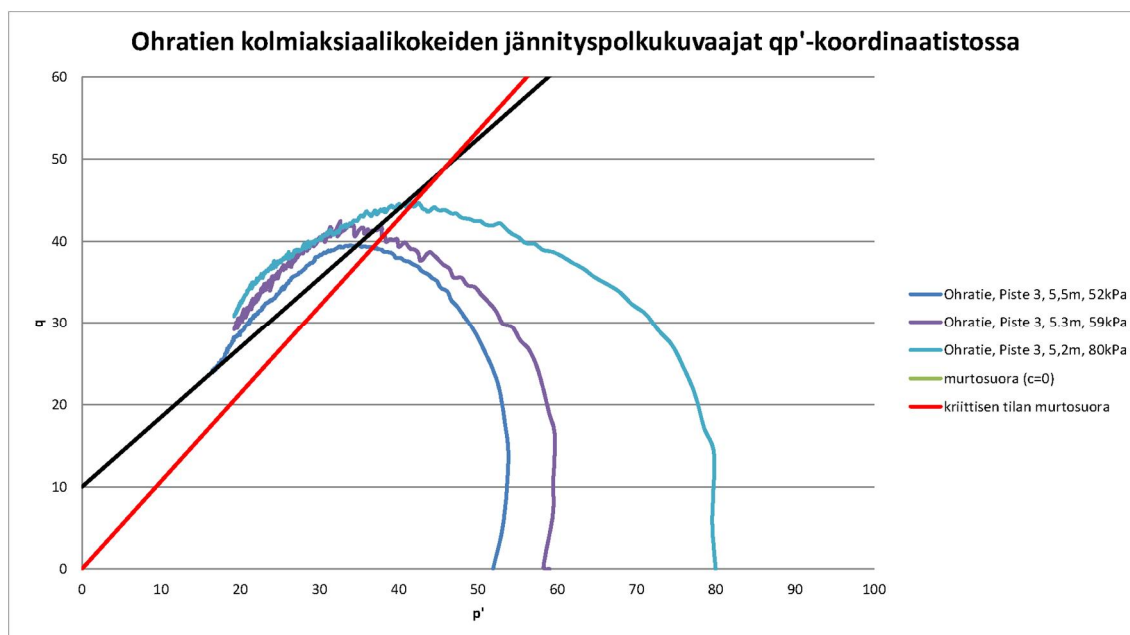
Kuva 6.11. Siipi- ja painokairauksen kairausdiagrammit Ohratien kohteelta.

Siipikairauksella määritetty suljettu leikkauslujuus on heikoimmassa kohdassa alle 10kPa, kartiokokeella vastaavalla syvyydeltä määritetty leikkauslujuus on hieman yli 17kPa. Samaisella syvyydellä sensitiivisyyden perusteella savi on hyvin sensitiivistä. Kartiokokeissa ei kuitenkaan ole havaittavissa leikkauslujuuden johdonmukaista kasvua, joten lukuarvoja ei tule verrata suoraan keskenään. Saven voidaan kuitenkin olettaa häiriintyneen siipikairausta tehdessä. Samasta pisteestä tehdyssä painokairauksessa ei siipikairaustulosta vastaavaa heikompaa kerrosta ole havaittavissa. Tämä vahvistaa edelleen epäilyksiä häiriintyneestä siipikairauksesta.

Laskelmissa käytetyt siipikairauksella määritetyt suljetun leikkauslujuuden arvot ovat redusoimattomia. Mikäli tuloksia halutaan redusoida, olisi sopiva redusointikerroin kartiokokeella määritetyn hienousluvun perusteella n. 0,9-1,0

Kolmiakσιαalikokeet

Kolmiakσιαalikokeet on tehty ödometrikokeen jälkeen arvioidusta heikoimmasta maakerroksesta. Ödometrikokeen perusteella määritetyn konsolidaatiojännityksen perusteella on määrätty sellipaineet joilla kokeet on tehty. Sellipaineeksi on määritetty 52, 60, ja 80kPa. Kolmiakσιαalikokeen jännityspolkukuvaajat p' - q -koordinaatistossa on esitetty kuvassa 6.12.



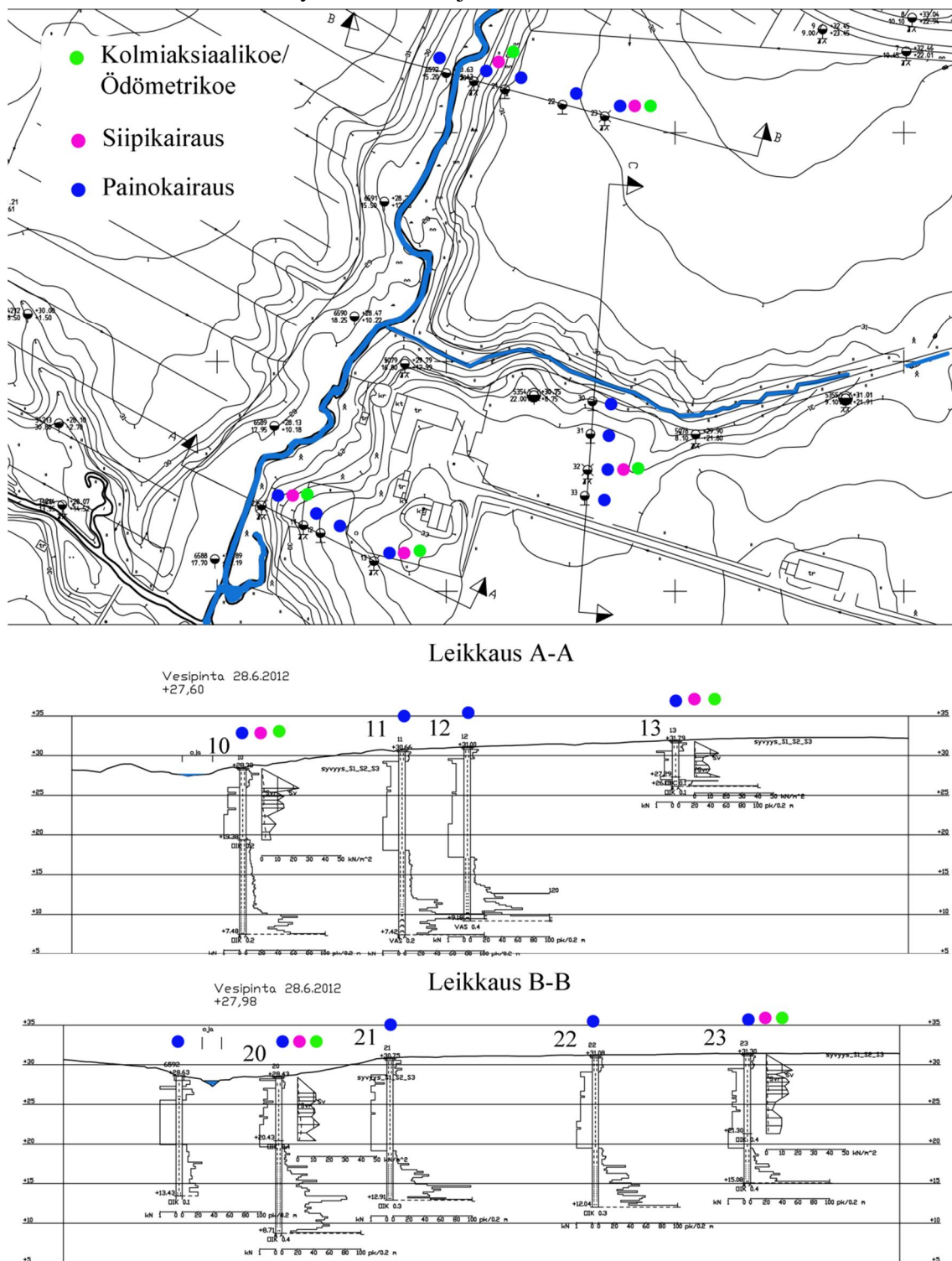
Kuva 6.12. Ohratieltä tehtyjen kolmiakσιαalikokeiden jännityspolkukuvaajat p' - q -koordinaatistossa.

Kolmiakσιαalikokeiden tulokset asettuvat hyvin samalle suoralle, joten kokeita voidaan pitää onnistuneina. Kokeiden perusteella kriittisen tilan kitkakulmaksi on määritetty $\phi_c' = 27^\circ$ ($c' = 0$).

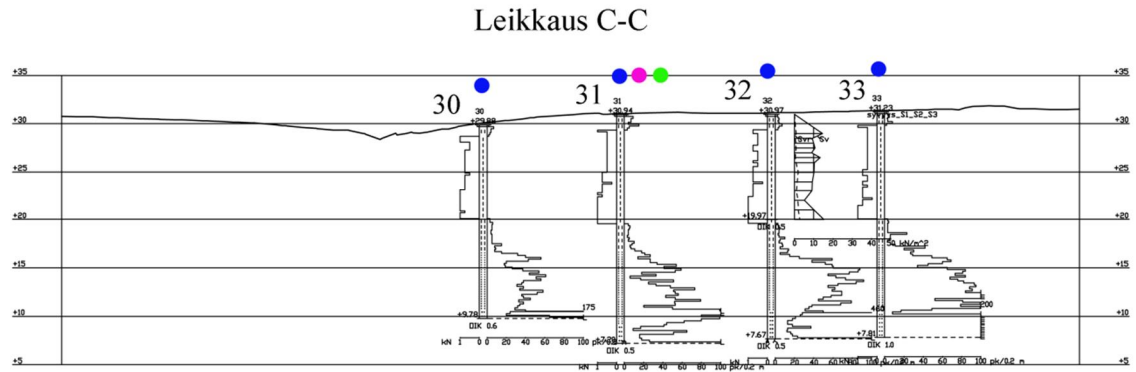
6.3 Vallinoja

6.3.1 Tehdyt lisätutkimukset

Vallinojalla tehtiin tämän työn puitteissa laajimmat pohjatutkimukset. Lisäksi käytössä oli alueella aikaisemmin tehtyjen pohjatutkimusten materiaali. Pohjatutkimukset ja tutkimusleikkaukset on esitettykuvassa 6.13 ja 6.14.



Kuva 6.13. Vallinojalla tehdyt pohjatutkimukset ja tutkimusleikkaukset.



Kuva 6.14. Vallinojan tutkimusleikkaus C-C.

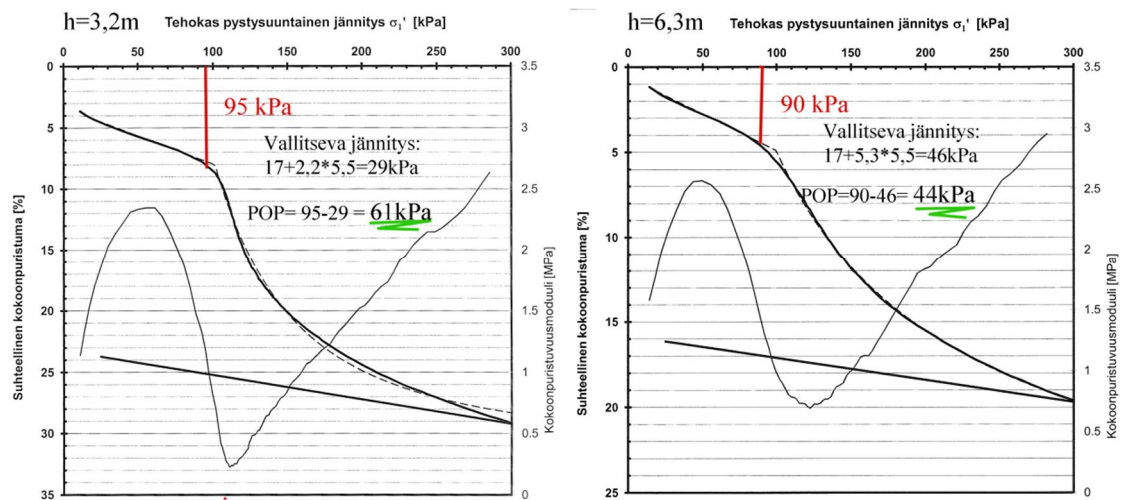
Täydentävät tutkimukset käsittävät kolme leikkausta, jossa tehtiin paino- ja siipikairauksia ja otettiin viidestä pisteestä häiriintymättömät näytesarjat.

Häiriintymättömiä näytteitä on otettu A-A ja B-B leikkauksista Rekolanojasta katsottuna lähimmästä ja kauimmaisesta tutkimuspisteestä. Näytteistä on tehty kolmelta eri syvyydeltä ödometrikokeita, rakeisuuden ja vesipitoisuuden määrittäksiä sekä kummastakin leikkauksesta kolmiakσιαalikoesarjat.

6.3.2 Tutkimustulokset ja laskentaparametrien määrittäminen

Ödometrikokeet

Ödometrikokeita on tehty kustakin tutkimusleikkauksessa. Leikkauksessa A-A ja B-B ödometrikokeita on tehty sekä ojan vierestä että kauempaa osasta. Pisteiden 10 ödometrikokeissa nähdään varsin erikoinen tulos, sillä konsolidaatiojännitys savikerroksen pintaosissa on suurempi kuin samassa kerroksessa syvemmällä.

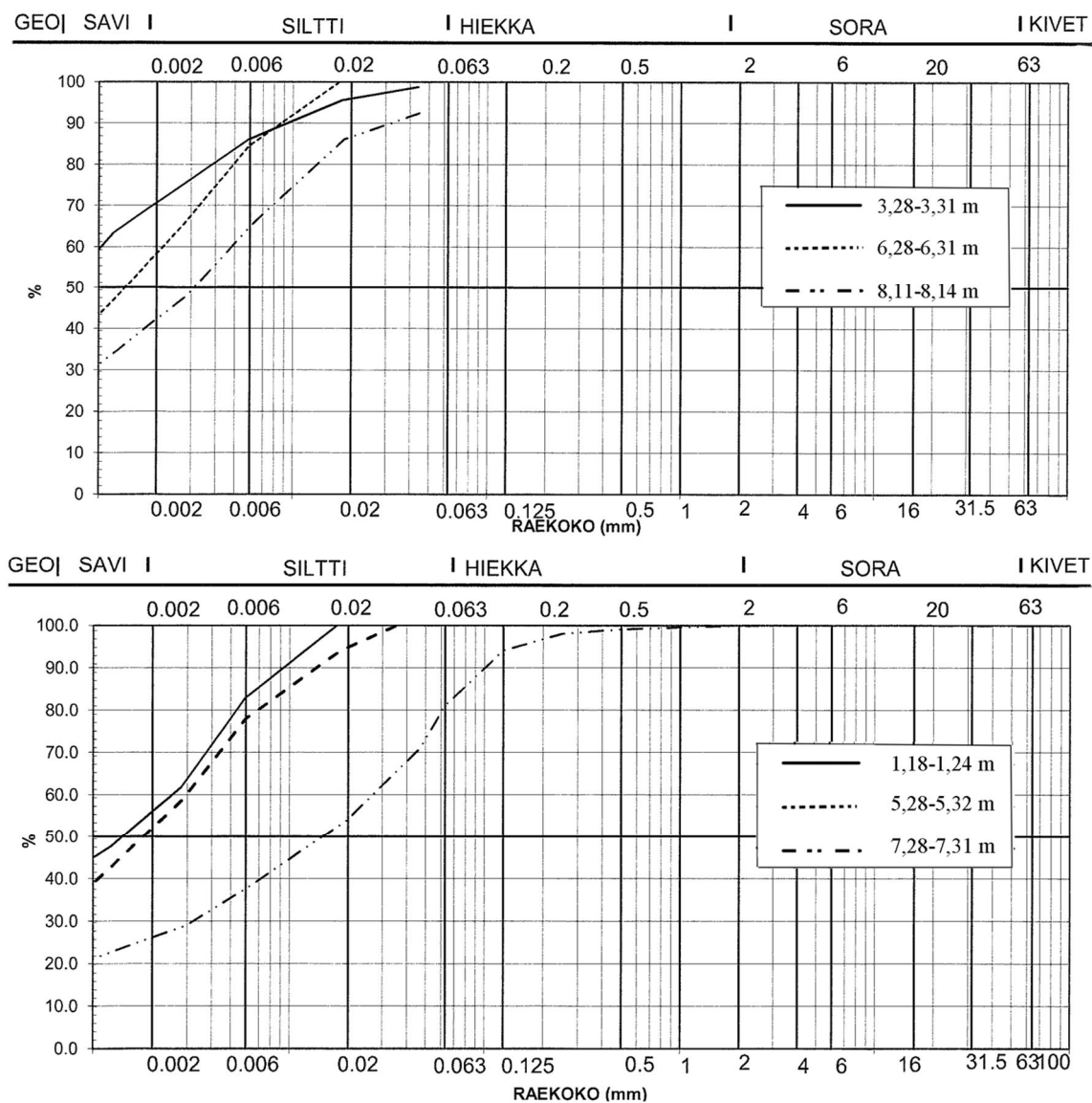


Kuva 6.15. Vallinojan pisteen 10 ödometrikokeen tulokset 3,2 ja 6,3m syvyydeltä

Kuorman aiheuttamana tällainen ilmiö ei ole mahdollista vaan tulokseen on voinut vaikuttaa mm. aiemmin työssä mainittu kapillaarinen imu.

Rakeisuus

Rakeisuuksia on määritetty kunkin näytepisteen osalta kolmelta eri syvyydeltä. Rakeisuuksien perusteella kuivakuorikerroksen alapuolella on 5...10 metrin paksuinen lihavän saven kerros. Syvemmälle mentäessä savi muuttuu silttisemmäksi ja lopulta siltiksi.



Kuva 6.16. Pisteen 10 ja 20 rakeisuuskäyrät

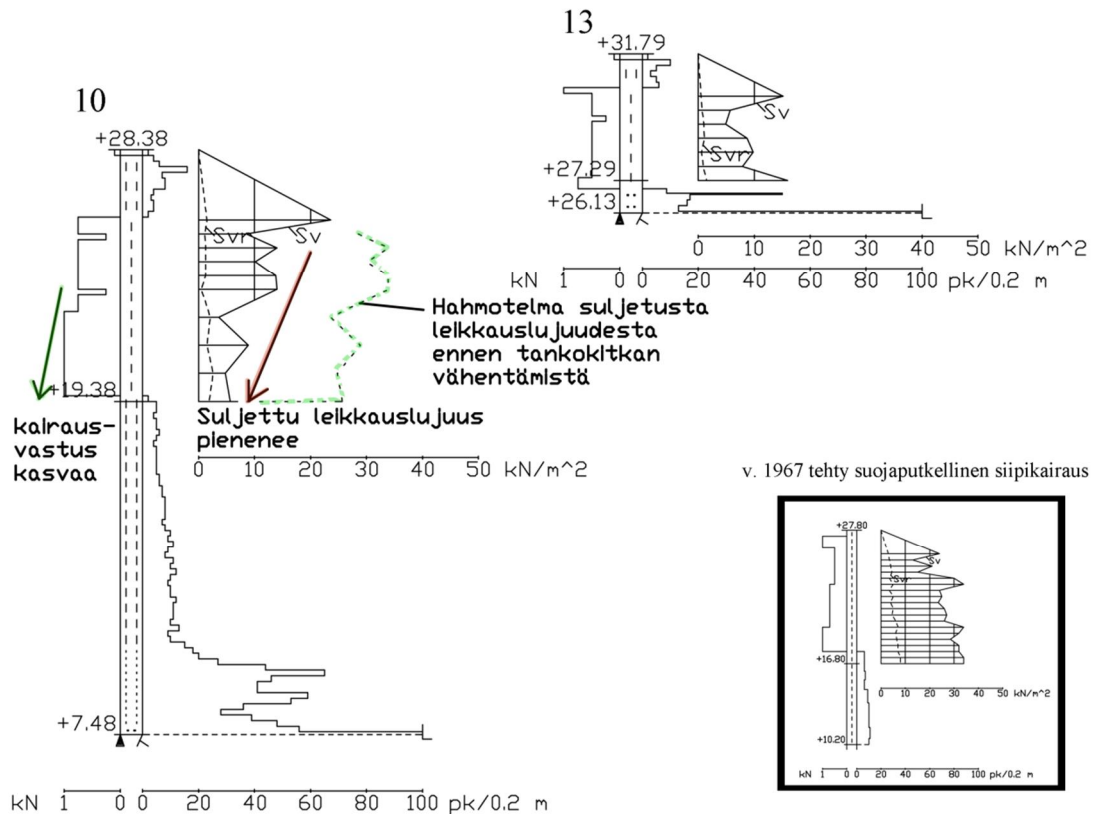
Taulukko 6.5. Pisteiden 20 ja 23 indeksiominaisuuksia taulukoituna.

	PISTE 20		PISTE 23	
näyte tunnus				
laboratorio n:o				
syvyys m	2.28-2.31	5.28-5.32	2.28-2.31	6.28-6.31
vesipitoisuus %	62.6	52.4	88.7	86.7
hienousluku F	51.0	47.0		81.0
leikkauslujuus sk	13.7	22.7		26.2
leikkauslujuus skr	0.66	1.77		1.47
sensitiivisyys St	20.8	20.8		17.8
lujuusluku H1	3.62	5.8		7.4
märkätilavuuspaino kN/m ³	14.6	17.3	14.6	14.9
humus %				
painumakoe	x	x	x	x
maalaji: tutkittu	Sa	Sa	Sa	Sa

Taulukossa 6.5 on esitetty pisteistä 20 ja 23 määritettyjä indeksiominaisuuksia. Vesipitoisuuksien osalta suuremmat vesipitoisuudet on määritetty ojasta katsottuna kaukaisimmasta tutkimuspisteestä, mitä voidaan pitää odottamattomana tuloksena. Kaikissa näytteissä maalaji on todettu saveksi. Kartiokokeella määritetyt suljetun leikkauslujuuden tulokset on myös esitetty kuvan taulukossa.

Paino- ja siipikairaukset

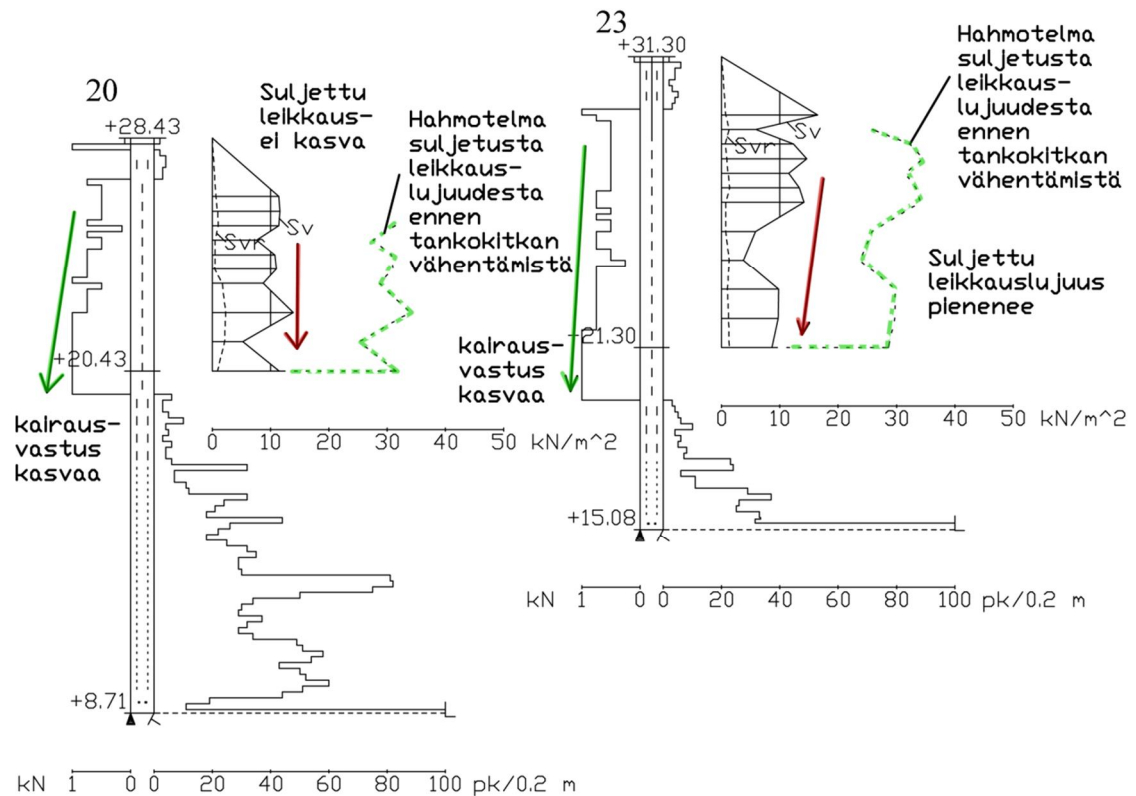
Vallinojalla siipikairauksia on tehty tutkittavissa leikkauksissa sekä Rekolanojan vierestä että kauempaa ojasta. Kairauksissa ei ole havaittavissa selkeää suljetun leikkauslujuuden kasvua jokipenkereellä verrattaessa kairauksiin, jotka on tehty kauempaa ojan uomasta. Huomioitavaa on myös, että Rekolanoja on luonteeltaan kaupunkipuromainen vesistö ja poikkeaa kooltaan ja ominaisuuksiltaan selvästi Vantaanjoesta ja Keravanjoesta. Siipikairaustuloksissa on huomattavissa samanlaisia epäloogisia lujuuden kehityksiä kuin muillakin kohteilla. Suljetun leikkauslujuuden kasvua tehokkaan jännityksen kasvaessa ei kairauksista pystytä osoittamaan. Kuvissa 6.17 ja 6.18 on esitetty A-A ja B-B leikkauksissa tehtyjen siipikairausten kairausdiagrammit.



Kuva 6.17. Leikkauksessa A-A tehdyt siipikairaukset ojan vierestä ja kauempaa ojasta. Vertailun vuoksi alakulmassa esitetty myös suojaputkella tehty siipikairaus ojan reunalta vuodelta 1967.

Siipikairaukset on tehty sähköisellä kairakalustolla, jossa tankokitka vähennetään automaattisesti itse siipikairan pyörittämisellä aikaansaadusta leikkauslujuudesta. Kairausdatasta selvitetty tankovastus on kohteella ollut varsin korkea, kairaa jilta saadun tiedon mukaan aivan pintaosia lukuun ottamatta 20...25 kPa. Tankokitkan osuus on siis huomattavan suuri ottaen huomioon saatujen siipikairalujuuksien arvoihin, jotka jäivät monin paikoin alle 10 kPa. On mahdollista, että tankokitkan suora vähentämien kokonaisuuksissaan syö varsinaisen siipikairauksen lopullista lujuutta. Suojaputkella tehtävässä kairauksessa tätä ongelmaa ei syntyisi. Vuonna 1967 tehdyissä suojaputkellisissa siipikairauksissa lujuudet ovat huomattavasti suurempia. Kuvissa 6.17 ja 6.18 on esitetty hahmotelma lujuuksista ennen tankokitkan vähentämistä.

Laskelmissa käytetyt siipikairauksella määritetyt suljetun leikkauslujuuden arvot ovat redusoimattomia. Mikäli tuloksia halutaan redusoida, olisi sopiva redusointikerroin kartiokokeella määritetyn hienousluvun perusteella n. 0,85-1,0, tutkimusleikkauksesta riippuen.

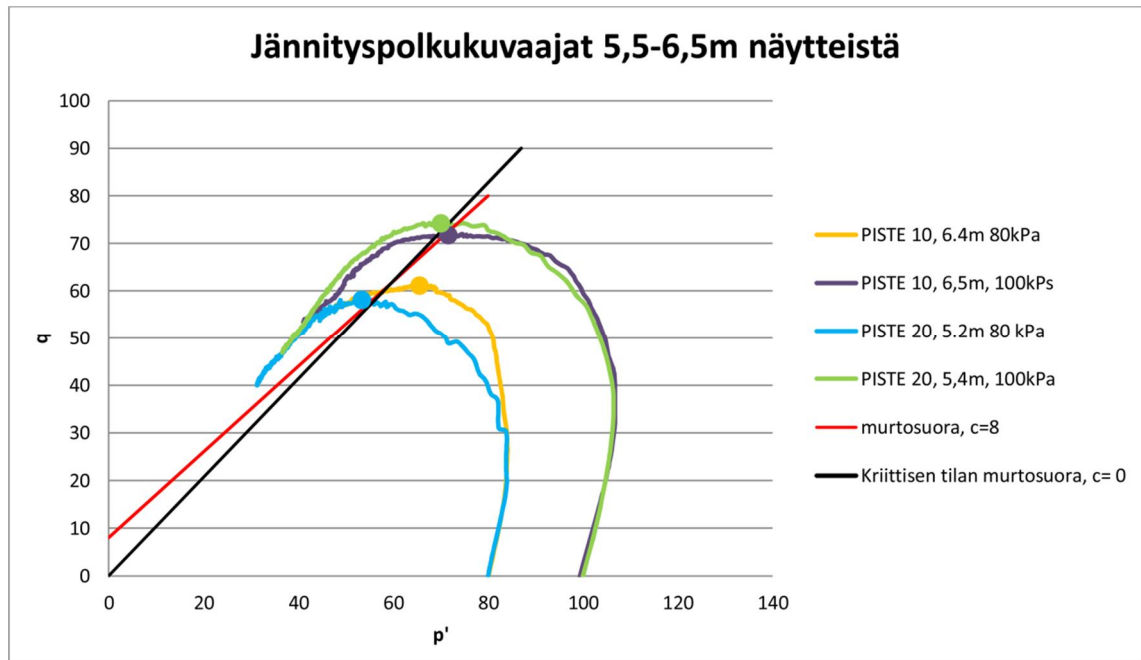


Kuva 6.18. Leikkauksessa B-B tehdyt siipikairaukset.

Kairaustuloksia voidaan verrata taulukossa 6.5 esitettyihin kartiokokein määritettyihin suljetun leikkauslujuuden arvoihin. Kartiokokeella määritetyt suljetut leikkauslujuudet 6m molemmiin puolin vaihtelevat 22...26 kPa ja siipikairauksilla vastaavan syvyyden lujuudet vaihtelevat 6...10 kPa. Kartiokokeessa määritetyn sensitiivisyyden mukaan savi on kohtalaisen häiriintyvää. Suuret erot suljettujen leikkauslujuuksien arvoissa voi mahdollisesti johtua maan häiriintymisestä siipikairauksen yhteydessä. Koska laboratoriossa tehtyjen havaintojen mukaan savi on paikoin kerroksellista, on myös mahdollista, että kartiokokeiden maanäytteeseen on sattunut silttikerros jolloin määritetyt leikkauslujuudet ovat savikerroksen arvoja suurempia.

Kolmiaksaalikokeet

Tehtyjen painokairausten perusteella Vallinojalla savikerros on n. 10 metriä paksu. Kolmiaksaalikokeilla on haluttu selvittää saven lujuusominaisuuksia ja määrittää savelle tehokkaat lujuusparametrit. Kolmiaksaalikokeita on tehty pääasiassa savikerroksen puolivälistä mutta myös hieman lähempää maanpintaa, jossa ödometrikokeissa havaittiin paikoin varsin suuriakin konsolidaatiojännityksiä. Kolmiaksaalikokeita päädyttiin tekemään savikon puolivälistä, 5,5,-6,5m syvyydestä kaksi koetta sekä A-A että B-B- leikkauksesta. Kolmiaksaalikokeiden jännityspolkukuvaajat p/q -koordinaatistossa on esitetty kuvassa 6.19.



Kuva 6.19. Jännityspolkukuvaajat Vallinojan savikolta 5,5-6,5m syvyydeltä.

Jännityspolkukuvaajat kulkevat varsin loogisesti ja vastaavat hyvin toisiaan. p' - q -kuvaajasta on määritetty savelle tehokkaat laskentaparametrit käyttäen laskentakaavoja 6.1.-6.4. Määritetyt laskentaparametrit on esitetty taulukossa 6.6.

Taulukko 6.6. Kolmiaksaalikokeella määritetyt tehokkaat laskentaparametrit.

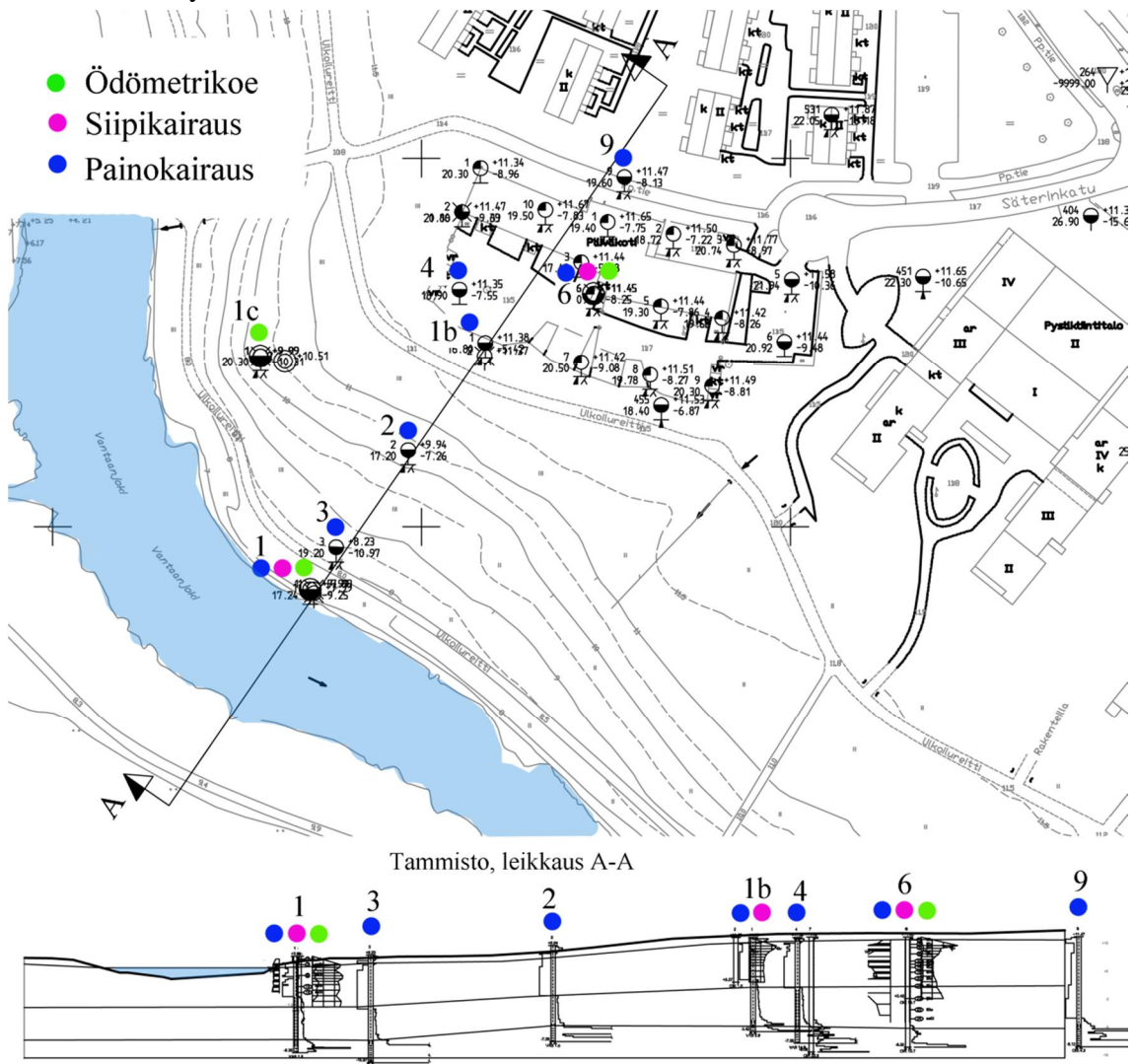
q_0	k_1	M	c'	φ'	φ_c	K_0	r_u'
8.0	0.9	1.0	3.7	23.0	26.1	0.6	0.19

Laskelmissa käytetyt maakerrokset ja laskentaparametrit on esitetty laskelmien yhteydessä kappaleessa 7.

6.4 Tammisto

6.4.1 Tehdyt tutkimukset

Tammiston osalta laskelmat on tehty käyttäen olemassa olleita pohjatutkimustietoja. Koska työn aikana mukaan tuli Ohratien kohde, ei lisätutkimuksia Tammiston osalta tämän työn tiimoilta lähdetty tekemään. Olemassa olevaa tutkimustietoa on kuitenkin siinä määrin runsaasti, että laskelmat voidaan tehdä hyödyntäen tässä työssä tehtyjä havaintoja. Kolmiaksauslaskelmien puuttuminen heikentää tehokkailla parametreilla tehtävien laskelmien tarkkuutta. Tammiston laskelmissa huomioitut tutkimuspisteet ja leikkaus on esitetty kuvassa 6.20.



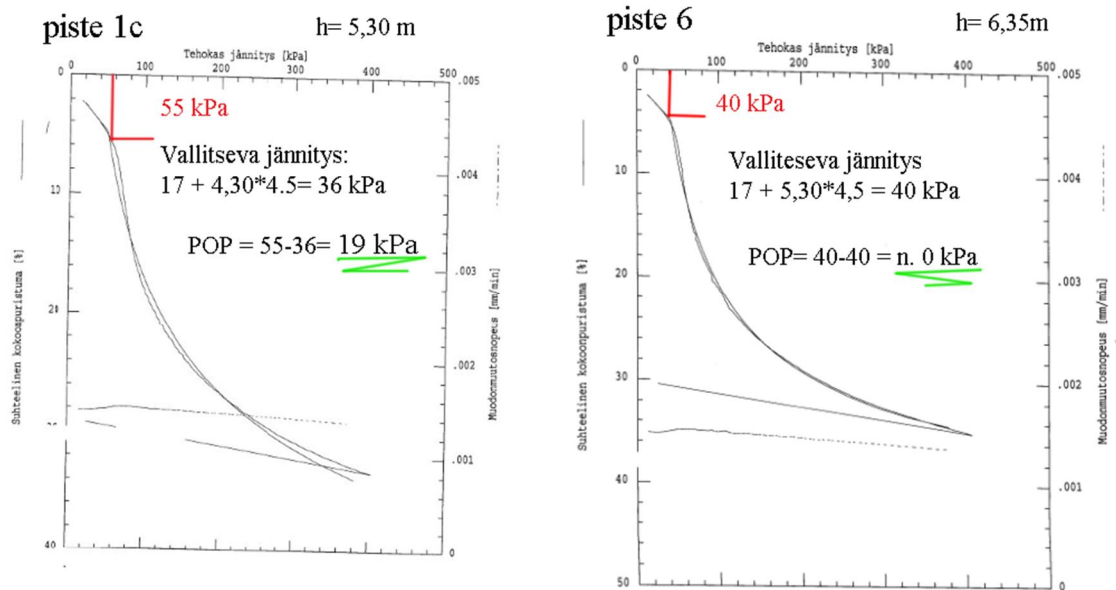
Kuva 6.20. Tammissa tehdyt tutkimukset ja tutkimusleikkaus esitettynä kartalla.

Tammistosta käytettävissä oli runsaasti painokairauksia, useita siipikairauksia ja häiriintymättömien näytteiden näytenpisteitä. Häiriintymättömistä näytteistä on tehty vaihtelevasti rakeisuuden määrittäviä, vesipitoisuus-, kartio- ja odometrikokeita.

6.4.2 Tutkimustulokset ja laskentaparametrien määrittäminen

Ödometrikokeet

Tammistossa ei ödometrikokeita ole tehty aivan jokitörmältä. Lähimmät ödometrikokeet on tehty n. 30 metrin etäisyydeltä joesta otetuista näytteistä. Koska joesta katsottuna lähin ödometrikoe on tehty varsin kaukaa jokipenkereeltä, ei jokipenkereen mahdollista lujittumista voida ödometrikokein täydessä mittakaavassa osoittaa. Jokipenkereen lujittumisesta on kuitenkin viitteitä myös verrattaessa 30 metrin ja 100 metrin etäisyyksiltä joesta tehtyjä kokeita vertailemalla.

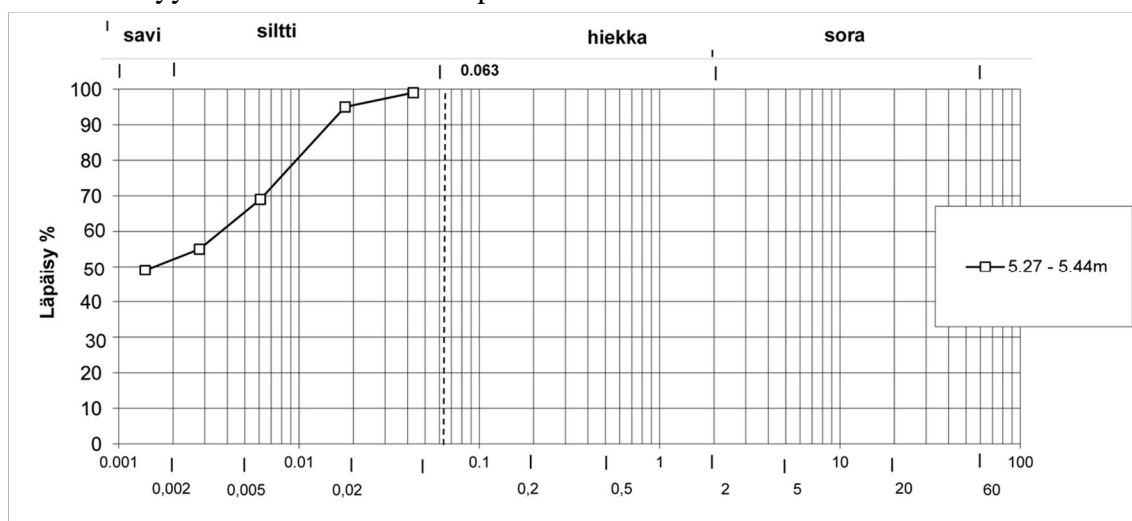


Kuva 6.21. Leikkauksen A-A läheisyydestä tehtyt ödometrikokeet 30m ja 100m etäisyydeltä joesta.

Kuvassa 6.21 esitetyissä ödometrikokeista huomataan maan olevan lähempänä jokipenkerettä jossain määrin ylinkonsolidoitunutta. Selvästi jokipenkereen takana savi on normaalikonsolidoitunutta.

Rakeisuus

Rakeisuuksia Tammistosta on määritetty poikkileikkauksen näytepisteestä, joka sijaitsee 100 m etäisyydeltä. Kuivakuoren alapuolinen maakerros on lihavaa savea.



Kuva 6.22. Poikkileikkauksessa A-A määritetty savinäytteen rakeisuus pisteestä 6.

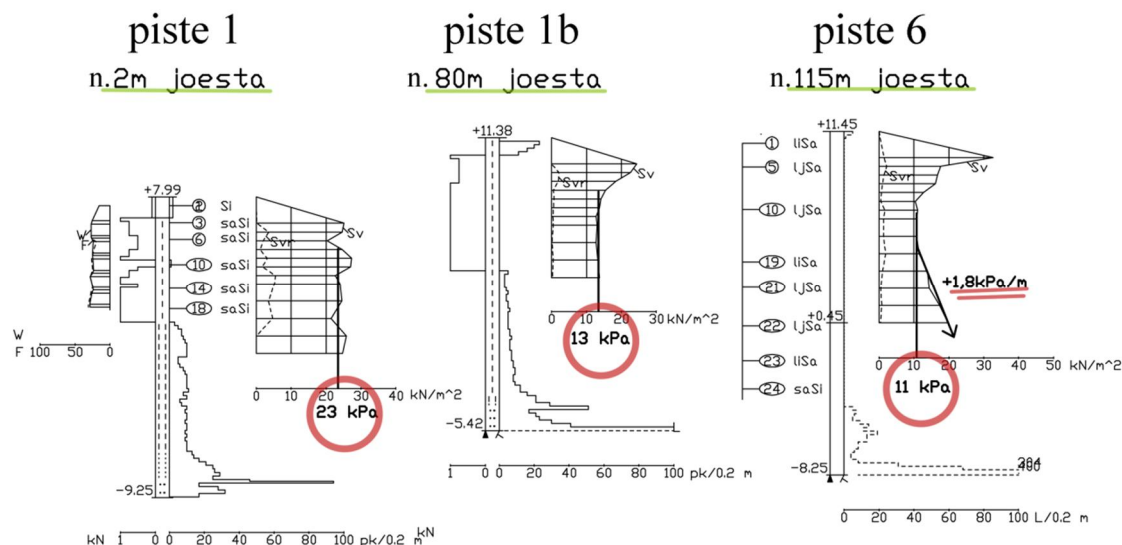
Taulukko 6.7. Pisteestä 1 ja 6 tehtyjen indeksikokeiden tuloksia 5 ja 7 m syvyydeltä.

	PISTE 1		PISTE 6	
näyte tunnus	a	d	a	b
laboratorio n:o	8955	8962	11796	11806
syvyys m	5.27-5.44	7.44-7.61	5.3	7.44-7.61
vesipitoisuus %	69.5	96.7	100.2	53.6
hienousluku F	64	83		44.5
leikkauslujuus sk	18.8	21.5	16.8	13.4
leikkauslujuus skr	1.18	0.81	1.09	0.70
sensitiivisyys St	15.9	26.5	15.4	19.1
lujuusluku H1	6.70	4.42	5.83	3.83
märkätilavuuspaino kN/m ³	15.9	14.6	14.5	16.7
humus %				
painumakoe	x		x	
maalaji: tutkittu	liSa	liSa	liSa	liSa

Indeksiominaisuuksien vertailussa on huomioitava, että kaikissa näytteissä on ollut kerroksellisuutta ja saven seassa paikoin silttikerrostumia. Silttikerrostuman sattuessa näytteen kohdalle voi se vaikuttaa huomattavasti mm. näytteen vesipitoisuuteen. Taulukossa 6.7 onkin nähtävissä epäloogisia vesipitoisuuden muutoksia. Kartiokokein määritetyt suljetut leikkauslujuudet taas poikkeavat siipikairatuloksista etenkin pisteestä 6 tehtyjen kokeiden osalta.

Siipikairaukset

Siipikairauksia tutkittavan poikkileikkauksen läheisyydessä on kolme kappaletta. Siipikairatuloksissa on havaittavissa sama suljetun leikkauslujuuden aleneminen siirryttäessä joesta kauemmaksi, kun mitä tässä työssä aikaisemmin on käsitelty.



Kuva 6.23. Siipikairausdiagrammit leikkauksessa A-A 2, 80 ja 115 metrin etäisyydeltä joesta.

Suljettu leikkauslujuus putoaa jokipenkereeltä 80m etäisyydelle siirryttäessä lähes puoleen. Pisteestä 6 tehdyssä siipikairauksessa on havaittavissa puolenvälin jälkeen jonkinlaista lujuuden kasvua mikä osoittaa lujuuden kasvua kasvavan tehokkaan pystyjännityksen suhteessa.

Laskelmissa käytetyt siipikairauksella määritetyt suljetun leikkauslujuuden arvot ovat redusoimattomia. Mikäli tuloksia halutaan redusoida, olisi sopiva redusointikerroin kartiokokeella määritetyn hienousluvun perusteella n. 0,85-1,0, tutkimusleikkauksesta riippuen.

7 LASKELMAT

7.1 Yleistä

Kaikilla kohteilla on tehty sarjat vakavuustarkasteluja. Tarkastelut on tehty järjestyksessä niin, että ensin on tehty vähiten pohjatutkimuksia vaativat tarkastelut ja viimeiseksi tarkastelut, jotka vaativat eniten tutkimustietoa. Ensimmäisenä tehtiin laskelmia Pirttirannan kohteella. Pirttirannan kohteella laskelmia tehtiin useata erilaista tilannetta mallintaen. Pirttirannan poikkileikkauksia on tarkasteltu seuraavassa järjestyksessä:

1. Siipikairauksella määritetyllä suljetulla leikkauslujuudella, käyttäen samaa leikkauslujuutta koko poikkileikkauksen alueella. Lujittumisilmiötä ei ole huomioitu.
2. Siipikairauksella määritetyillä suljetuilla leikkauslujuuksilla, käyttäen jokitor-mällä lujittuneen saven leikkauslujuutta.
3. Kolmiaksiaalikohteessa määritetyillä tehokkailla parametreilla, ilman huokospaine parametrin käyttöä
4. Kolmiaksiaalikohteessa määritetyillä tehokkailla parametreilla, huokospaine parametria käyttäen.
5. Kolmiaksiaalikohteessa määritetyillä tehokkailla parametreilla, huokospaine parametri ja lujittunut jokipenger huomioiden
6. Vertailulaskelmat FEM-laskentamenetelmällä Plaxis-ohjelmaa käyttäen.

Pirttirannan laskelmien perusteella muiden kohteiden laskentayhdistelmät valittiin kohde kohtaisesti.

Yleisesti mitoittavana laskentatilanteena on käytetty liukupintasortuman kannalta vaarallisinta tilannetta, jossa joenpinta on ensin pitkään korkealla ja sen jälkeen laskee nopeasti jokiuomassa. Tällöin jokipenkerellä vesi on vielä korkealla ja aiheuttaa lisäkuormaa, kun taas jokiuomassa vastapainona toimiva vesimassa on pienimmillään. Tilanne voi esiintyä etenkin kevään ja kesän vaihteessa.

Kunkin poikkileikkauksen tulokset on koottu lopuksi samaan taulukkoon vertailun helpottamiseksi. Taulukossa esitetään kunkin poikkileikkauksen kohdalla tilanteen mukaisesti valittu, vertailukelpoiselta etäisyydeltä joesta kulkeva liukupinta ja sen tuotamaa varmuusluku. Lisäksi on ilmoitettu etäisyys joesta, jolla vaadittu 1,8 varmuustaso saavutetaan.

7.2 Pirttiranta

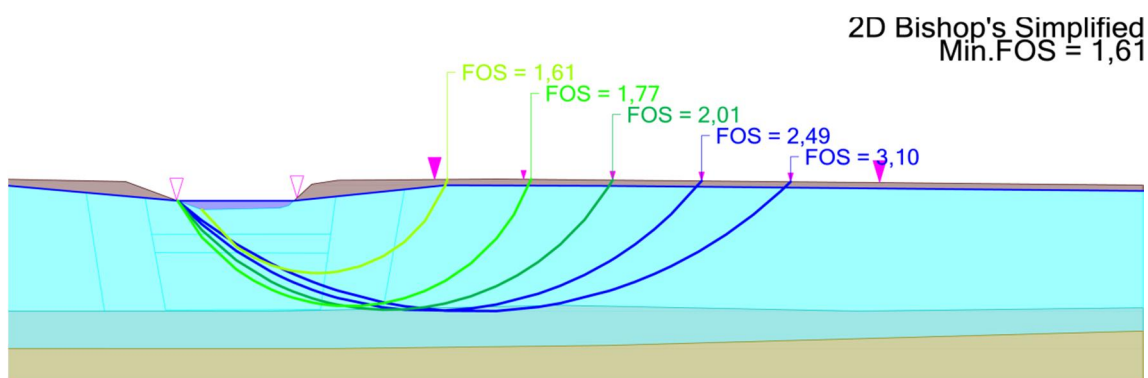
Pirttirannan osalta laskelmissa on tarkasteltu yhtä poikkileikkausta. Laskelmissa vedenpinnan tasona on käytetty tasoa +24.00, mikä tarkoittaa noin metrin vesisyvyyttä uoman keskellä. Stabiileetin kannalta vaarallisin tilanne syntyy, kun jokiuoman vedenpinta on alimmillaan. Tasoa +24.00 voidaan pitää alhaisena tasona ottaen huomioon, että esimerkiksi tilastollisesti kerran kymmenessä vuodessa mitoittava ylivesi (HW 1/10) on tasolla +29,17. Pirttirannan poikkileikkauksen geometriasta johtuen tarkasteltavaksi liukupinnaksi on määritetty n. 20 metrin etäisyydeltä joesta alkava liukupinta. Pirttirannalla uoman jyrkästä geometriasta johtuen ei tutkittu aivan jokipenkereen reunan stabiili-teettia. Koska alueelle ei ole suunnitteilla rakentamista lähelle jokea vaan kohdetta käytetään hyvän tutkimusaineiston vuoksi lähinnä tarkastelukohteena, rajattiin tutkittavat liukupinnat pois aivan joen rannasta. Myös jokipenkan lujittuminen vähentää progressiivisen sortuman syntymistä, jokipenkan reunan sortuessa sortuman ei odoteta lähtevän etenemään. Taulukossa 7.1 on esitetty Pirttirannan kohteella käytetyt laskentaparametrit.

Taulukko 7.1. Pirttirannan poikkileikkauksessa käytettävät maakerroksen ja niiden laskentaparametrit.

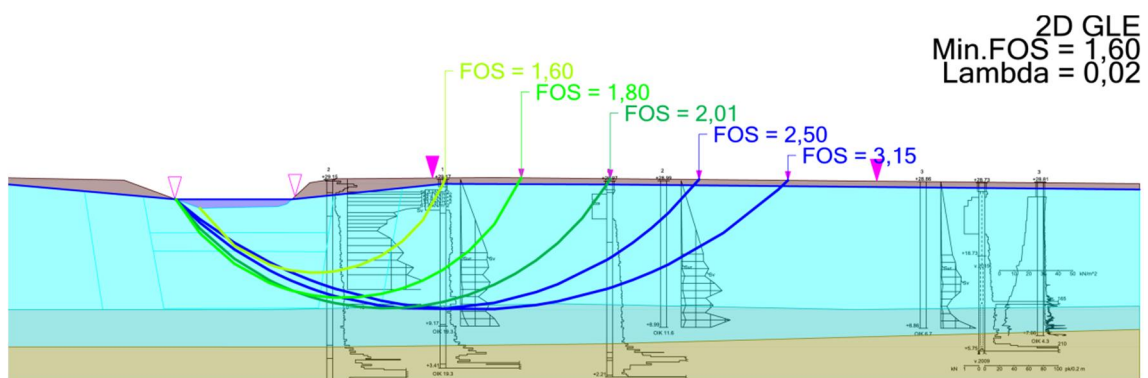
PIRTTIRANTA		Tilavuus-paino	Koheesio	Kitka-kulma	Suljettu leikkauslujuus	Lujuuden kasvu	Huokospaine-parametri
LASKENTAPARAMETRIT		γ kN/m ³	c' kPa	φ' kPa	S_u kPa	$\Delta s_u/m$	ru'
	Kuivakuori	17	0	0	30		0
	Lujittunut savi	15	0	25	20		0
	Lujittunut savi	15	0	25	20	3	0
	Lievästi lujittunut savi	15	0	25	15	2,5	0,11
	Savi	15	0	25	15		0,22
	Pohjamaa	18	0	34	0		0

1. Su-parametreilla, ilman lujittumisen huomiointia

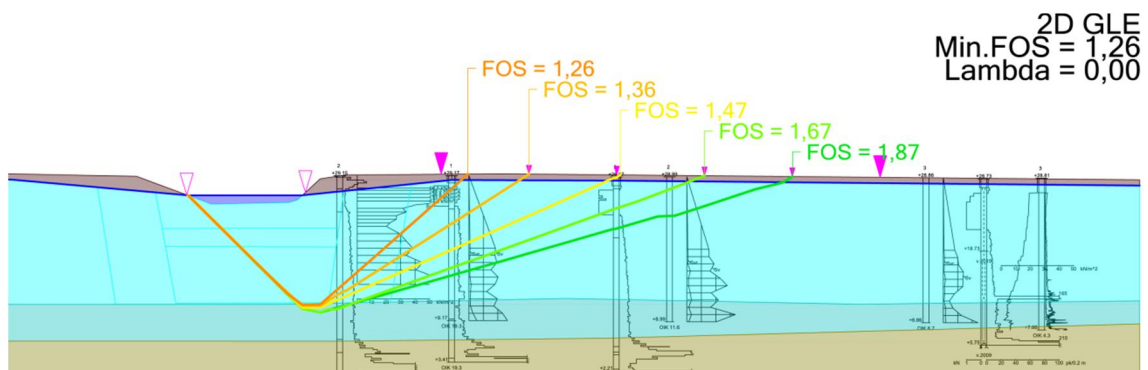
Ensimmäinen tapaus on laskettu käyttäen siipikairauksella määritettyä saven suljettua leikkauslujuutta. Pirttirannassa kairatut lujuudet ovat varsin heikkoja joesta poispäin liikuttaessa. Laskevan geometrian ansiosta hyvin pitkät liukupinnat eivät tästä huolimatta ole kriittisimpiä.



Kuva 7.1. Lasketut 5 liukupintaa Bishopin yksinkertaisella menetelmällä, suljetulla leikkauslujuudella ilman lujittuneen osan huomiointia.



Kuva 7.2. Lasketut 5 liukupintaa GLE menetelmällä ympyrän muotoista liukupintaa käyttäen, suljetulla leikkauslujuudella ilman lujittuneen osan huomiointia.



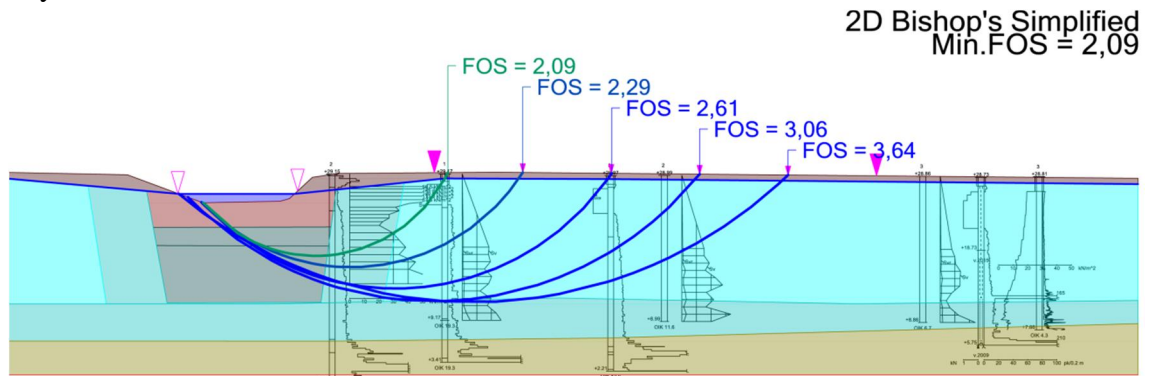
Kuva 7.3 Lasketut 5 liukupintaa GLE menetelmällä vapaata liukupintaa käyttäen, suljetulla leikkauslujuudella ilman lujittuneen osan huomiointia.

Vertailua varten valittu 20 metrin etäisyydellä joesta kulkeva liukupinta on laskettu molemmilla laskentamenetelmillä. Tällä laskentatavalla kokonaisvarmuudeksi sortumista vastaan on Bishopin menetelmällä saatu 1,61 ja GLE menetelmällä 1,26.

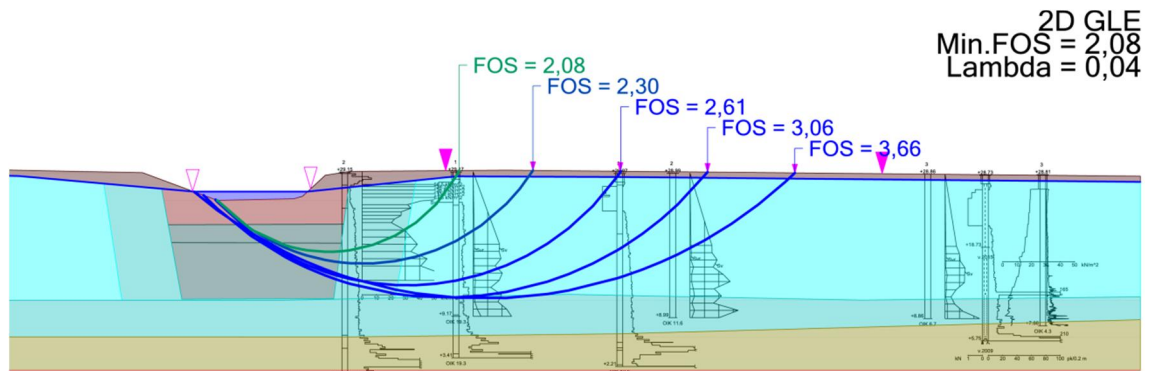
2. Su-parametreilla, lujittuminen huomioiden

Lujittuminen on Su- parametrilla laskettaessa huomioitu niin, että Plaxis mallinnukseen perustuen lujittunut alue on ulotettu joen leveydelle. Uoman alapuolella on käytetty pintaosassa kairatuloksen mukaista 20 kPa leikkauslujuutta ja syvemmällä kerrosta jossa leikkauslujuus kasvaa n. 3 kPa metriä kohden. Lujittuneen alueen reunoille on mallin-

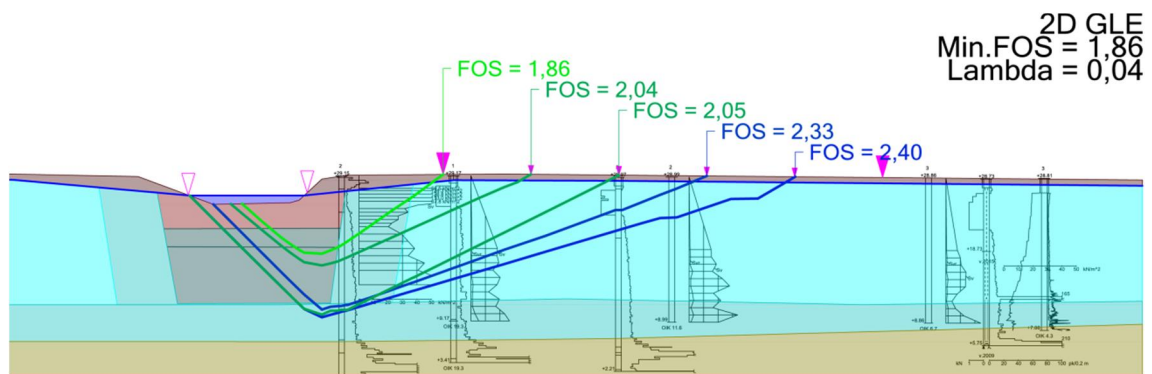
nettu siirtymävyöhyke missä leikkauslujuutena on käytetty 17 kPa, edustaen keskiarvoa lujittuneen ja löyhän saven väliltä. Ympäristön savi on laskettu 15 kPa leikkauslujuutta käyttäen.



Kuva 7.4 Lasketut 5 liukupintaa Bishopin yksinkertaisella menetelmällä, suljetulla leikkauslujuudella ja lujittunut osa huomioiden.



Kuva 7.5. Lasketut 5 liukupintaa GLE menetelmällä ympyrän muotoista liukupintaa käyttäen, suljetulla leikkauslujuudella ja lujittunut osa huomioiden.

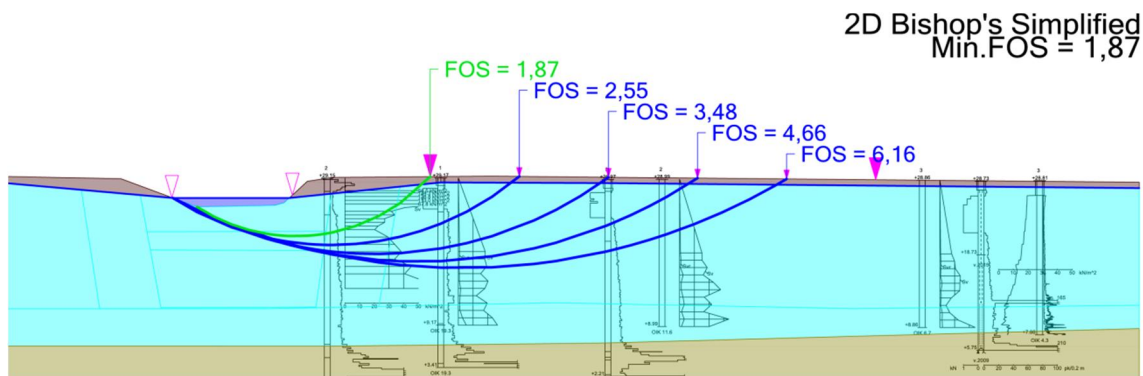


Kuva 7.6. Lasketut 5 liukupintaa GLE menetelmällä vapaata liukupintaa käyttäen, suljetulla leikkauslujuudella ja lujittunut osa huomioiden.

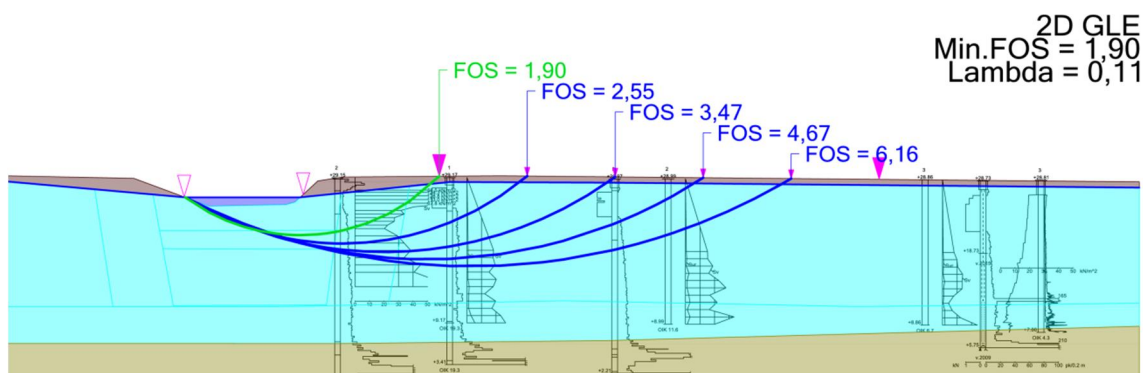
20 metrin etäisyydeltä lasketun liukupinnan kokonaisvarmuus sortumista vastaan on Bishopin menetelmällä 2,09 ja GLE menetelmällä 1,86.

3. Kitkakulmalla, ilman huokospaineen kasvua ja lujittumista

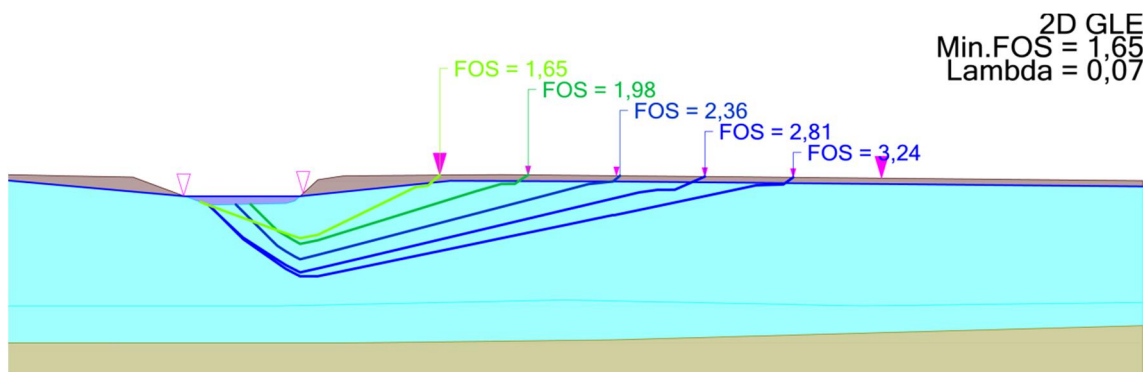
Kolmas laskenta on tehty käyttäen kolmiakσιαalikokeessa määritettyä kitkakulmaa. Samaa kitkakulmaa käytetään koko savikerroksessa huolimatta sen lujittuneista alueista, olettaen että savi on samaa savikerrosmuodostumaa koko alueella.



Kuva 7.7. Lasketut 5 liukupintaa Bishopin yksinkertaisella menetelmällä, tehokkailla parametreilla ja ilman huokospaineen kasvun ja lujittumisen vaikutuksen huomiomista.



Kuva 7.8. Lasketut 5 liukupintaa GLE menetelmällä ympyrän muotoista liukupintaa käyttäen, tehokkailla parametreilla ja ilman huokospaineen kasvun ja lujittumisen vaikutuksen huomiomista.

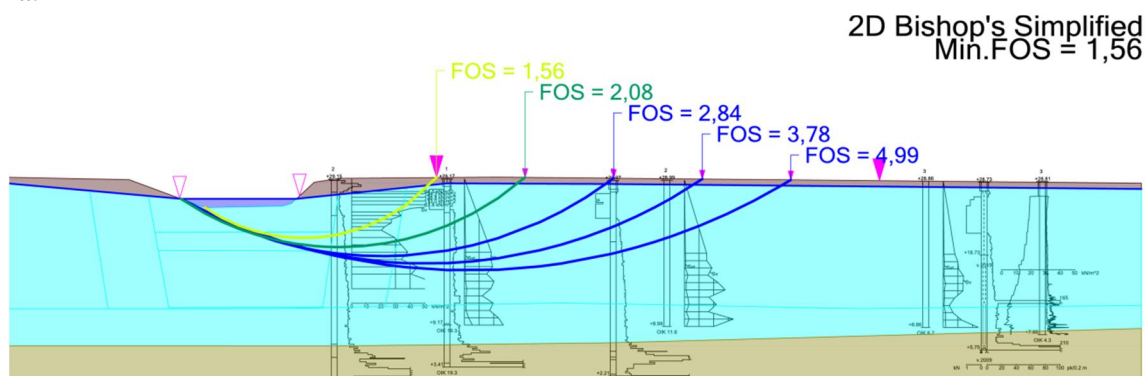


Kuva 7.9. Lasketut 5 liukupintaa GLE menetelmällä vapaata liukupintaa käyttäen, tehokkailla parametreilla ja ilman huokospaineen kasvun ja lujittumisen vaikutuksen huomioimista.

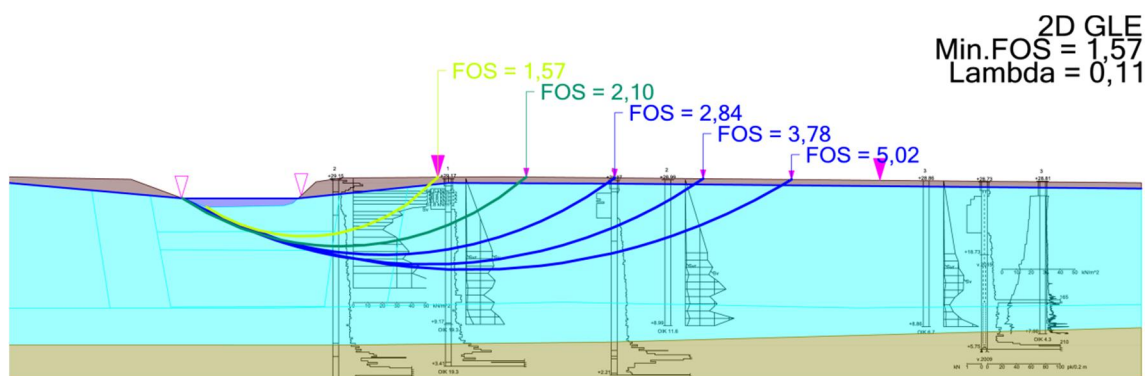
Kitkakulmalla laskettaessa 20 metrin etäisyydeltä joesta kulkevan liukupinnan varmuus murtumista vastaan on Bishopin menetelmällä 1,87 ja GLE menetelmällä 1,65.

4. Kitkakulmalla, huokospaineen kasvu huomioiden mutta ilman lujittumista.

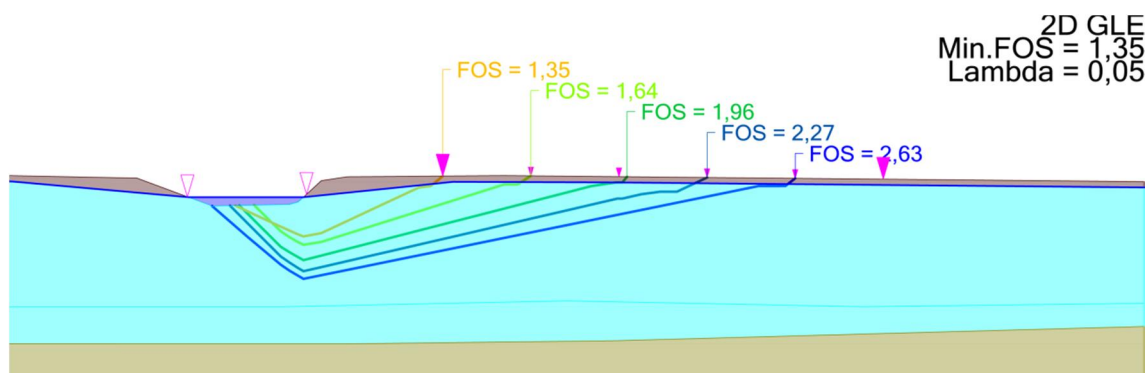
Mikäli lujittumista ei huomioida, mutta lasketaan tilannetta huokospaineparametria käyttäen, tehdään laskelmia reilusti varman puolella. Tällöin huokospaineen kasvu mahdollistetaan koko savikerroksen laajuudella, myös lujittuneen jokiuoman alapuolella.



Kuva 7.10. Lasketut 5 liukupintaa Bishopin yksinkertaisella menetelmällä, tehokkailla parametreilla, huokospaineen kasvu huomioiden mutta ilman lujittumisen huomiointia.



Kuva 7.11. Lasketut 5 liukupintaa GLE menetelmällä ympyrän muotoista liukupintaa käyttäen, tehokkailla parametreilla, huokospaineen kasvu huomioiden mutta ilman lujittumisen huomiointia.

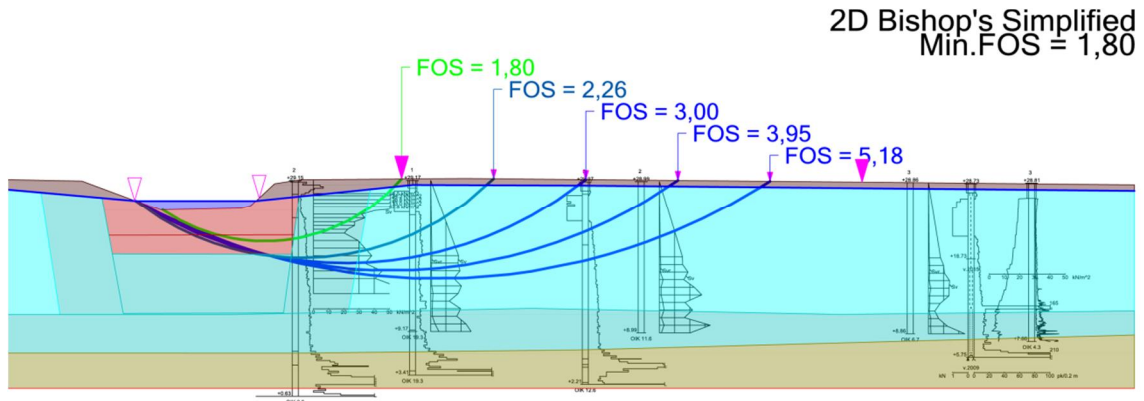


Kuva 7.12. Lasketut 5 liukupintaa GLE menetelmällä vapaata liukupintaa käyttäen, tehokkailla parametreilla, huokospaineen kasvu huomioiden mutta ilman lujittumisen huomiointia.

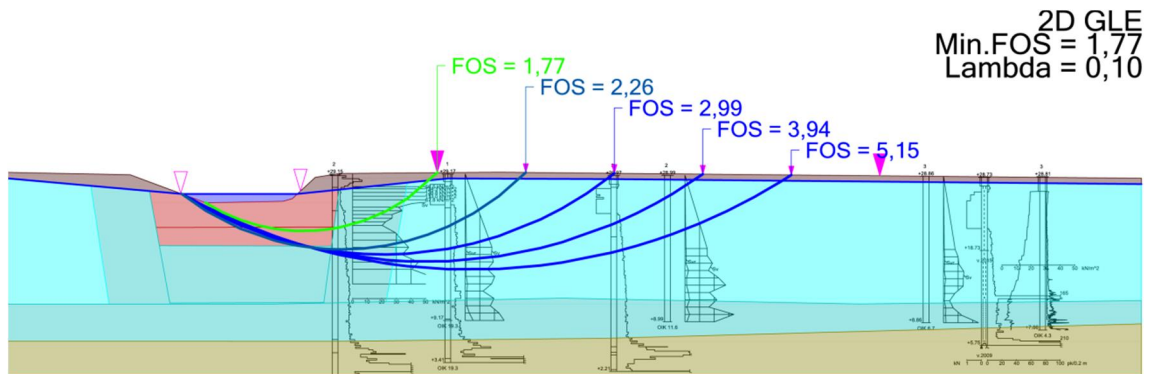
Laskettaessa 20 metrin etäisyydeltä joesta kulkevan liukupinnan varmuus murtumista vastaan on Bishopin menetelmällä 1,56 ja GLE menetelmällä 1,35.

5. Kitkakulmalla, huokospaineen kasvu ja lujittuminen huomioiden

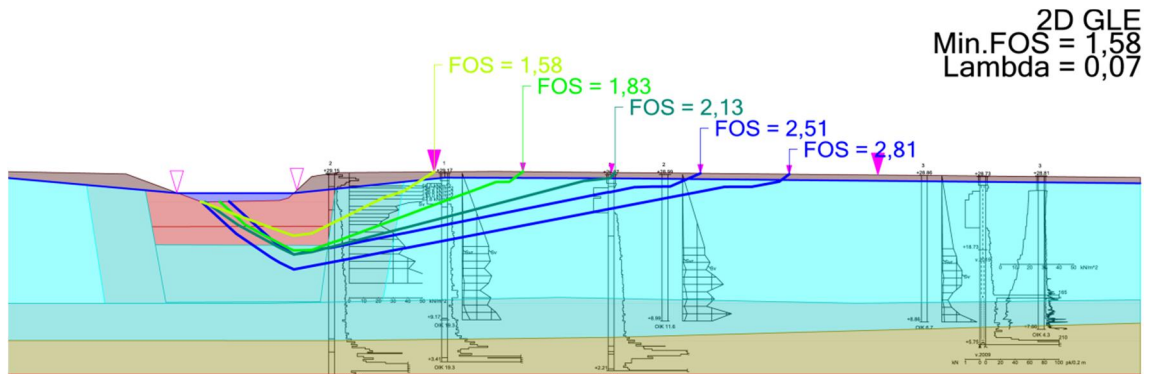
Koska vallitsevat jännitykset eivät vaikuta kitkakulman suuruuteen, on lujittuminen mahdollista ottaa huomioon vain huokospaineparametria muokkaamalla. Koska huokospaineparametri on kehitetty normalikonsolidoituneille saviille, ei sen käyttö ylikonsolidoituneella alueella sellaisenaan ole mielekäästä. Tässä tapauksessa lujittuneen saven kohdalla huokospaineparametri on asetettu nolllaksi, ja lievästi lujittuneen saven kohdalla $r_{0,n}$ arvona on käytetty puolta siitä arvosta jonka taulukko 4.7. osoittaisi kyseiselle kitkakulmalle.



Kuva 7.13. Lasketut 5 liukupintaa Bishopin yksinkertaisella menetelmällä, tehokkailla parametreilla, huokospaineen kasvu ja lujittumisen vaikutus huomioiden.



Kuva 7.14. Lasketut 5 liukupintaa GLE menetelmällä ympyrän muotoista liukupintaa käyttäen, tehokkailla parametreilla, huokospaineen kasvu ja lujittuminen huomioiden.

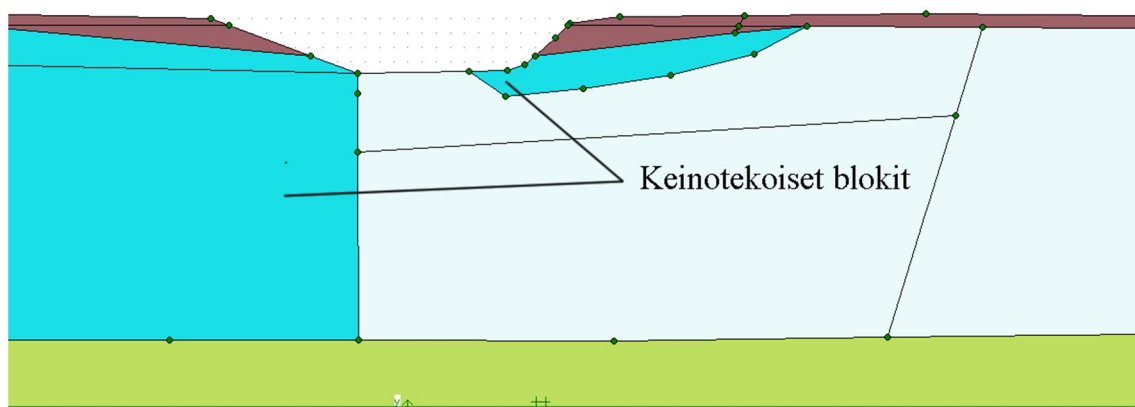


Kuva 7.15. Lasketut 5 liukupintaa GLE menetelmällä vapaamuotoista liukupintaa käyttäen, tehokkailla parametreilla, huokospaineen kasvu ja lujittuminen huomioiden.

20 metrin etäisyydeltä kulkevan liukupinnan varmuus murtumista vastaan on Bishopin menetelmällä 1,80 ja GLE menetelmällä 1,58.

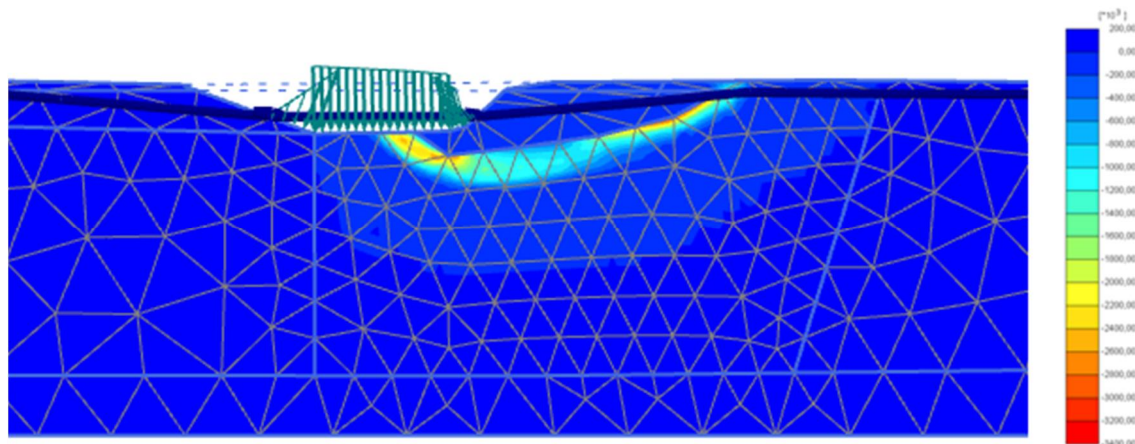
6. Vertailulaskelmat PLAXIS-ohjelmalla

Vertailulaskelmat on tehty mallintaen jokiuoman synty ja sen aiheuttama jokiuoman ja penkereen konsolidoituminen. Koska Plaxis-ohjelmassa ei tarkasteltavan liukupinnan sijaintia voida itse määrittää, on poikkileikkausmalliin jouduttu tekemään keinotekoisesti lujempia blokkeja. Blokeilla liukupinnan paikkaa ohjataan haluttuun kohtaan. Koska jyrkässä luiskassa käytännössä vaarallisin liukupinta tulee aivan luiskan pintaan, ei vertailu ole ilman keinotekoisia ohjausta mahdollista.



Kuva 7.16. Plaxis-malli, jossa on lisätty keinotekoiset, erittäin vahvat maablokit estämään epämieluisat liukupinnat.

Plaxis-laskelmilla varsinaista liukupintaa ei muodostu, mutta syntyvä liukupinta voidaan havainnoida tarkastelemalla suhteellisia muodonmuutoksia. Muodonmuutoksien suuruudet on esitetty kuvassa 7.17.



Kuva 7.17. Plaxis-ohjelmalla määritetty liukupinnan sijainti.

Koska vertailussa laskettu liukupinta on blokeilla pakotettu tietylle etäisyydelle, ei liukupinta ole varsinaisesti Plaxis-ohjelman määrittelemä vaarallisin liukupinta. Liukupinnalla ja sen tuottamalla varmuudella voidaan kuitenkin vertailla laskelmia ja tuloksia Geocalc-ohjelmalla määritettyihin tuloksiin. Liukupinta kulkee tässä tapauksessa 20

metrin etäisyydellä jokiuomasta ja sen varmuus sortumista vastaan on MC-materiaalimalliin perustuvalla varmuuslaskennalla 1,7 ja SS-materiaalimallilla manuaalisesti määritettynä 1,4.

Taulukko 7.2. Laskentatuloksia eri laskentamenetelmillä ja parametreilla laskettaessa.

Laskentamenetelmä		Bishop	GLE	
tutkitun liukupinnan muoto		Ympyrä	Ympyrä	Vapaa
Su-parametreilla				
1	Su-parametreilla, ilman lujittumisen huomiointia	1,61 35	1,60 35	1,26 68
2	Su-parametreilla, lujittuminen huomioiden	2,09 -	2,08 -	1,86 14
Kitkakulmalla				
3	Ilman huokospaineen kasvua ja lujittumista	1,87 17	1,90 17	1,65 25
4	Huokospaineen kasvu huomioiden mutta ilman lujittumista	1,56 25	1,57 25	1,35 37
5	Huokospaineen kasvu ja lujittuminen huomioiden	1,76 21	1,77 21	1,58 31
PLAXIS				
6	M-C-materiaalimallilla	1,67		
	SS- materiaalimallilla	1,37		
	Varmuus sortumista vastaan 20 m etäisyydeltä joesta			
	Etäisyys joesta, jolla 1,8 varmuustaso saavutetaan [m]			

Eri laskentatapauksia ja Plaxis-laskelmaa vertailtaessa nähdään varmuuslukujen olevan kauttaaltaan hyvinkin lähellä toisiaan. Ainoastaan suljettua leikkauslujuutta käyttäen ja lujittunut savi huomioiden laskettu varmuustaso on muista poiketen korkeampi ja 1,8 varmuus saavutetaan käytännössä kaikkialla. Kauttaaltaan Pirttirannassa stabiliteetti on nykyisellään riittävällä tasolla. Poikkileikkauksessa joesta poispäin laskeva geometria aiheuttaa vaarallisimman liukupinnan varsin lähelle jokea. Tehokkaat parametrit on määritetty kolmiaksiaalikoikeista joiden tulokset on varsin tulkinnanvaraisia ja laskelmissa on käytetty varsin varovaisia tulkintoja.

Tuloksista nähdään, ettei tarkempi laskentamenetelmä (GLE) tuota ympyräliukupintaa käytettäessä yksinkertaisesta menetelmästä (Bishop) poikkeavia tuloksia. Yhden desimaalin tarkkuudella lasketut varmuusluvut ovat molempien osalta samoja. Muiden kohteiden osalta GLE:tä käytettäessä ei ole tarpeellista tutkia ympyräliukupintaa käyttäen määritettyjä varmuuksia.

7.3 Ohratie

Ohratiella laskentatilannetta helpotti tieto liukupinnan yläpään sijainnista ja oletus jonka mukaan varmuus murtumista vastaan on oltava 1,0 tai hieman alle. Laskentaparametrit on esitetty taulukossa 7.3. Työssä mainittua jokipenkereen lujittumisilmiötä ei laskelmissa ole huomioitu, sillä sortuma tapahtui aivan jokipenkereellä eikä tällöin ole merkittävää tekijä on ollut penkerettä kuormittaneet tierakenteet.

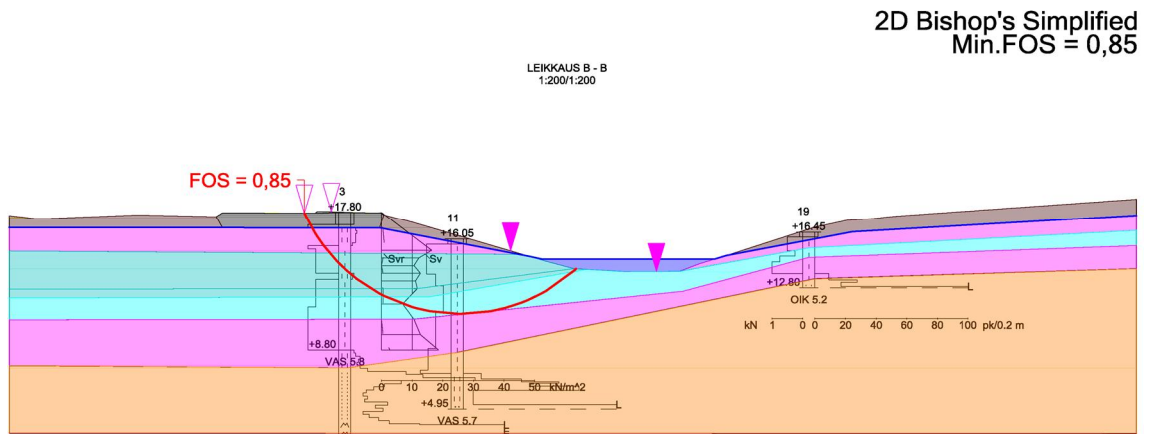
Taulukko 7.3. Ohratiella käytetyt maakerrokset ja laskentaparametrit.

OHRATIE		Tilavuus- paino	Koheesio	Kitka- kulma	Suljettu leikkauslujuus	Lujuuden kasvu	Huokospaine- parametri
LASKENTAPARAMETRIT		γ kN/m ³	c' kPa	φ' kPa	S_u kPa	$\Delta s_u/m$	ru'
	Tiepenger	20	0	36	0		0
	Kuivakuori	17	0	0	30		0
	Pehmeä savi	15,5	0	27	7		0,18
	Savi	16	0	27	11		0,18
	Siltti	18	0	27	15		0
	Pohjamaa	18	0	34	0		0

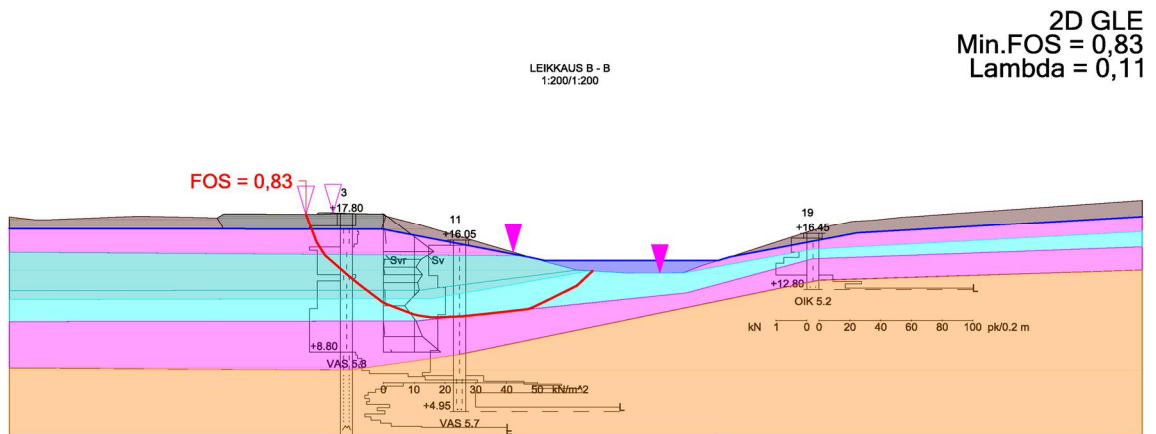
Laskennat on tehty tarkastelemalla seuraavia laskentatapauksia Bishopin menetelmällä ympyräliukupintaa ja GLE menetelmää vapaata liukupintaa käyttäen:

1. Suljetulla leikkauslujuudella laskenta
2. Tehokkailla parametreilla laskenta ilman huokospaineen kasvun huomioimista.
3. Tehokkailla parametreilla laskenta huokospaineen kasvu huomioiden
4. Vertailulaskelmat Plaxis-ohjelmalla.

Ohratiella laskelmat on pakotettu laskentarajojen avulla laskemaan liukupinta jonka yläpään sijainti alkaa kohdasta, jossa se todellisuudessa on tapahtunut. Mikäli laskentarajoja kasvatetaan, syntyy pienimmän kokonaisvarmuuden tuottava liukupinta lähelle todellista sortumakohtaa, kuitenkin välillä lähemmäksi ja välillä kauemmaksi joesta, laskentatavasta riippuen. Laskentarajojen pientä väliä puoltaa myös se, että syntynyt sortuma on muodoltaan kaareva, eikä yhtä liukupinnan yläpään sijaintia voida yksiselitteisesti osoittaa. Vaarallisin liukupinta on joka tapauksessa varsin lähellä määritettyjä laskentarajoja laskentatavoista riippumatta.

1. Suljetulla leikkauslujuudella laskenta.

Kuva 7.18. Laskettu vaarallisin liukupinta Bishopin menetelmällä ympyränmuotoista liukupintaa ja suljettua leikkauslujuutta käyttäen,

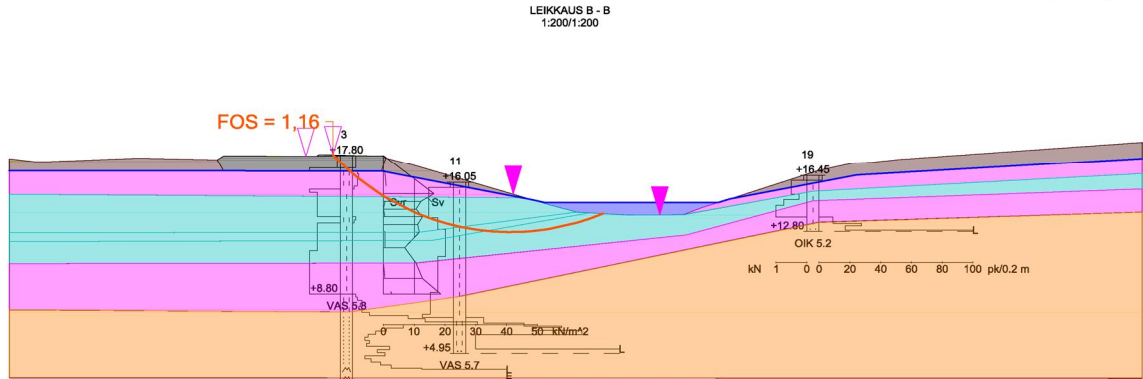


Kuva 7.18. Laskettu vaarallisin liukupinta GLE menetelmällä vapaata liukupintaa ja suljettua leikkauslujuutta käyttäen

Bishopin menetelmällä varmuus tutkitulla alueella on matalimmillaan 0,85 ja GLE menetelmällä 0,83

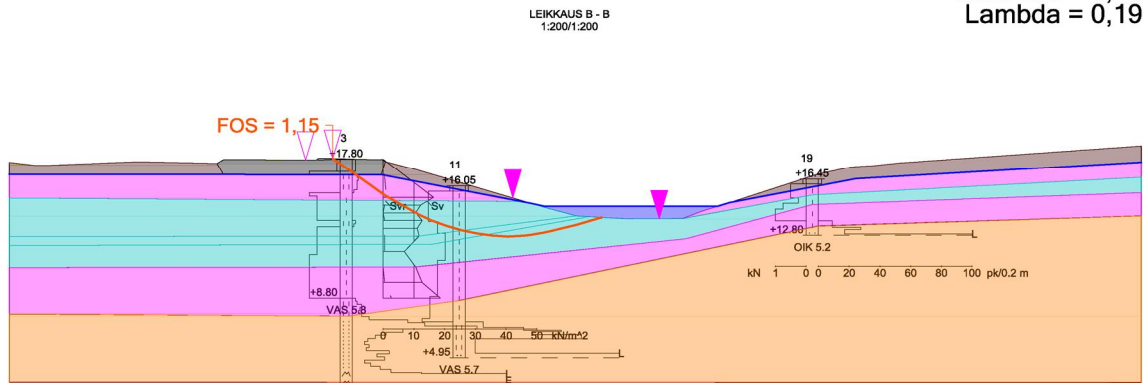
2. Tehokkailla parametreilla laskenta ilma huokospaineen huomiointia.

2D Bishop's Simplified
Min.FOS = 1,16



Kuva 7.19. Laskettu vaarallisin liukupinta Bishopin menetelmällä ympyränmuotoista liukupintaa ja tehokkaita parametreja käyttäen.

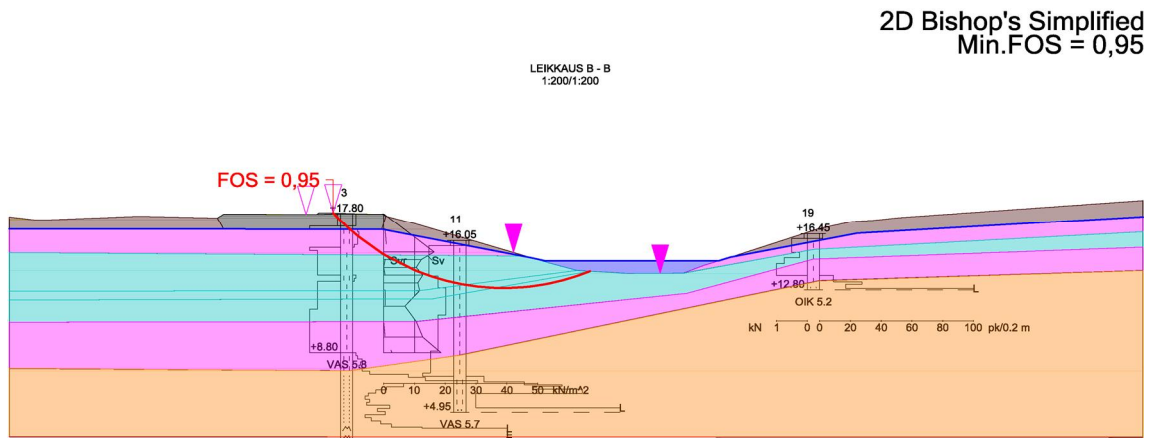
2D GLE
Min.FOS = 1,15
Lambda = 0,19



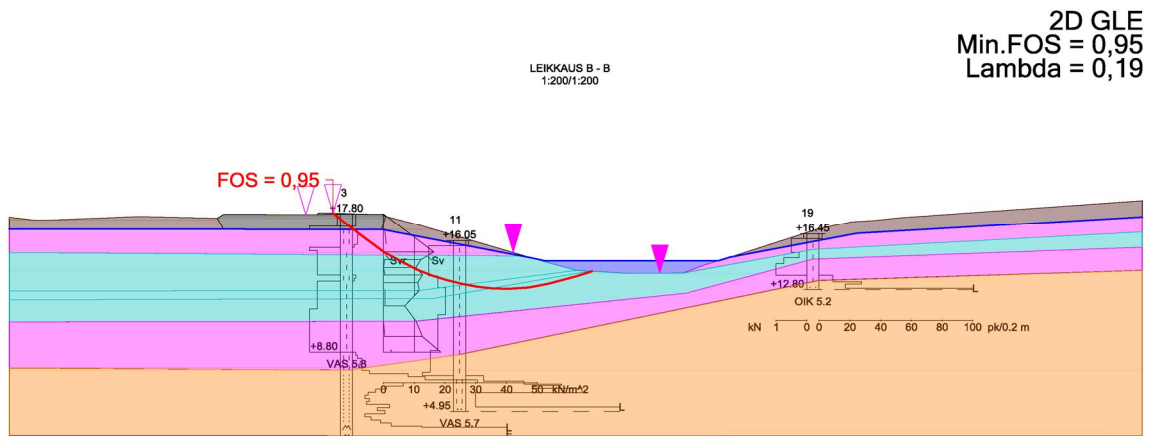
Kuva 7.20. Laskettu vaarallisin liukupinta GLE menetelmällä vapaata liukupintaa ja tehokkaita parametreja käyttäen.

Bishopin menetelmällä varmuus tutkitulla alueella on matalimmillaan 1,16 ja GLE menetelmällä 1,15

3. Tehokkailla parametreilla laskenta huokospaineen kasvu huomioiden

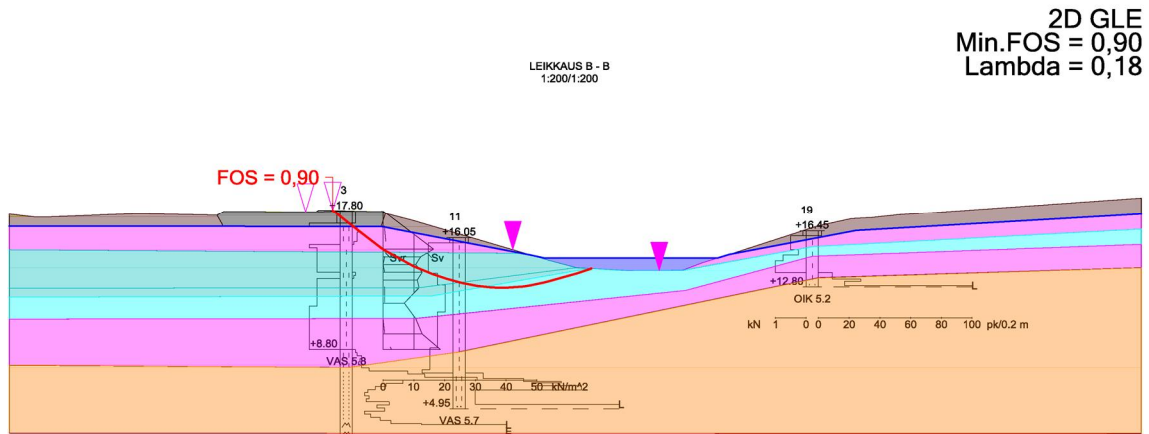


Kuva 7.21. Laskettu vaarallisin liukupinta Bishopin menetelmällä ympyränmuotoista liukupintaa ja tehokkaita parametreja käyttäen sekä huokospaineen kasvu huomioiden.



Kuva 7.22. Laskettu vaarallisin liukupinta GLE menetelmällä ympyränmuotoista liukupintaa ja tehokkaita parametreja käyttäen sekä huokospaineen kasvu huomioiden.

Vertailun vuoksi on vielä tutkittu tilanne jossa huokospaineparametria on kasvatettu hieman taulukon 4.8 arvoista. Laskelma on tehty käyttäen savella 0,22 ja pehmeällä savella 0,25 huokospaineparametrin arvoa.

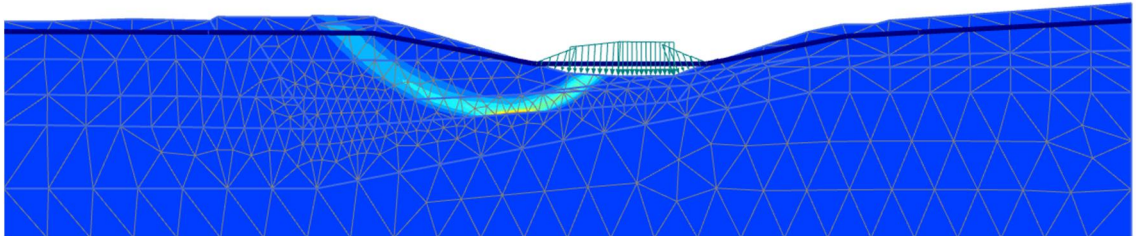


Kuva 7.23. Laskettu vaarallisin liukupinta GLE menetelmällä vapaata liukupintaa ja kasvatettuja huokospaineparametrejä käyttäen.

Bishopin menetelmällä varmuus tutkitulla alueella on matalimmillaan 0,95 ja GLE menetelmällä 0,95. Kasvatetuilla huokospaineparametrilla laskenta GLE menetelmällä varmuus putoaa hieman, ollen 0,90.

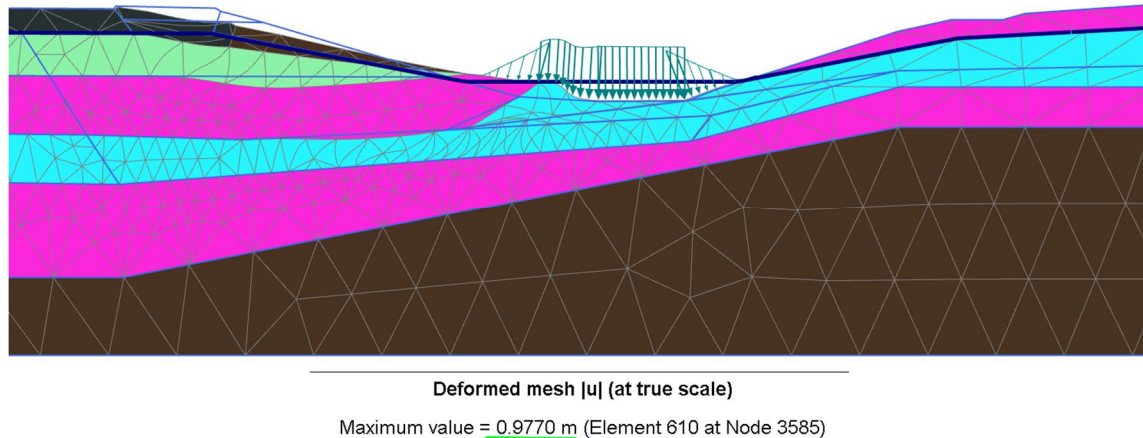
4. Vertailulaskelmat Plaxis-ohjelmalla.

Plaxis-ohjelmalla tehdyissä vertailulaskelmissa ei jokiuoman syntyä ole mallinnettu, sillä tien rakentamisen vaikutuksesta tilannetta on vaikea mallintaa luotettavasti. Määritetty vaarallisin liukupinta on esitetty kuvassa 7.27.



Kuva 7.24. Plaxis-ohjelmalla määritetty vaarallisin liukupinta.

Määritetyn liukupinnan yläpinta sijoittuu hyvinkin tarkasti todellisen sortuman yläpinnan kohdalle. Ohjelma ei varsinaisesti laske alle 1,0 varmuuksille varmuuskerrointa vaan laskenta pysähtyy sortuman tapahduttua. Tässä tapauksessa laskennassa päästiin 98% valmiustasoon, joten varmuus sortumaa vastaa on oletettavasti jossain 0,9-1,0 välissä. Kohteella tehtyjen mittausten mukaan sortuman yläpinnan kohdalla sortunut luisaka on sortuman jälkeen ollut n. 0,8-1,0 metriä sortumatonta tietä ylempänä. Plaxis-ohjelmalla lasketut siirtymät ovat suurimmillaan 0.98 metriä, joten määritetty liukupinta ja aiheutunut sortuma vastaa todellista tilannetta hyvin.



Kuva 7.25. *Plaxis- ohjelmalla lasketut siirtymät sortumatilanteessa.*

Koska sortuman tiedetään tapahtuneen, voidaan varmuuden oletettavan olevan alle yksi. Tehdyissä laskelmissa ilman huokospaineen huomioimista varmuudet ovat yli 1,0, joten ilman huokospaineen kasvun vaikutusta sortumaa ei laskennallisesti saada aikaiseksi.

Taulukko 7.4. *Tuloksia eri laskentamenetelmillä ja parametreilla laskettaessa.*

Laskentamenetelmä		Bishop	GLE
tutkitun liukupinnan muoto		Ympyrä	Vapaa
Su-parametreilla			
1	Su-parametreilla, ilman lujittumista	0,85	0,83
Kitkakulmalla			
2	Ilma huokospaineen kasvun huomioimista.	1,16	1,15
3	Huokospaineen kasvu huomioiden	0,95	0,95
PLAXIS			
4	M-C materiaalmallilla	n. 0,9-1,0	
	SS-materiaalmallilla	n. 0,9-1.0	
	Varmuus sortumista tapahtuneen sortuman kohdalla		

Vertailtaessa tuloksia, voidaan todeta laskentamenetelmän 3 ja 4 tuottavan toisiaan lähimpänä olevia varmuuksia. Liukupinnan muoto näyttäisi tarkastelujen perusteella olevan lähestulkoon ympyrä, jolloin tulokset eri laskentamenetelmien ovat hyvin lähellä toisiaan.

7.4 Vallinoja

7.4.1 Leikkaus A-A

Vallinojalla tehtyjen pohjatutkimusten perusteella ei yleisesti havaittavaa jokipenkereen lujittumista ole selkeästi havaittavissa. Koska selkeästi lujempaa savea ei jokipenkereeltä ole tulkittu, ei sitä myöskään laskelmissa ole lähdetty poikkileikkauksiin mallintamaan. Savikerros on mallinnettu yhtenäisenä kerroksena ja suljetun leikkauslujuuden arvoksi on valittu keskimääräinen siipikairauksella määritetty leikkauslujuus. Parametrien määrittäminen tarkemmin on esitetty luvussa 6 ja laskentaparametrit on esitetty taulukossa 7.5. Vallinojan vesipintana on käytetty tutkimusten ohessa mitattua tasoa +27,60 (28.6.2012), jolloin uoma on lähestulkoon tyhjä.

Taulukko 7.5. Vallinojalla A-A- leikkauksessa käytetyt laskentaparametrit.

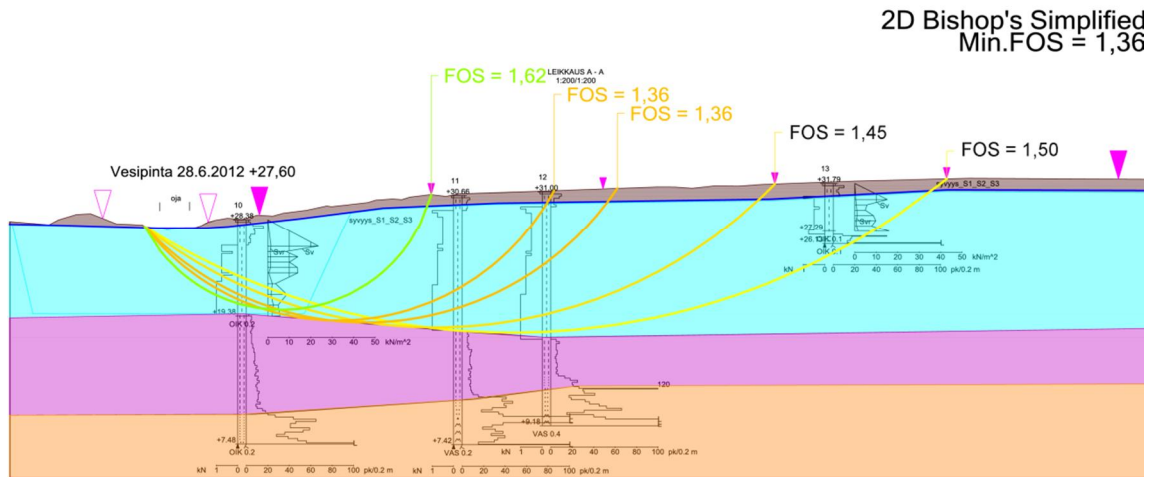
VALLINOJA		Tilavuuspaino	Koheesio	Kitkakulma	Suljettu leikkauslujuus	Lujuuden kasvu	Huokospaineparametri
LASKENTAPARAMETRI		γ kN/m ³	c' kPa	φ' kPa	S_u kPa	$\Delta s_u/m$	ru'
	Kuivakuori	17	0	0	30		0
	Lujittunut savi	15,5	0	26	10		0,19
	Lujittunut savi	16	0	28	0		0
	Lievästi lujittunut savi	18	0	34	0		0

Kohteella stabiilitettä tarkastellaan kolmea eri tapausta tarkastelemalla, kutakin Bishopin yksinkertaisella menetelmällä ympyräliukupintaa käyttäen, ja GLE menetelmällä vapaata liukupintaa käyttäen. Tarkasteltavat laskentatapaukset ovat:

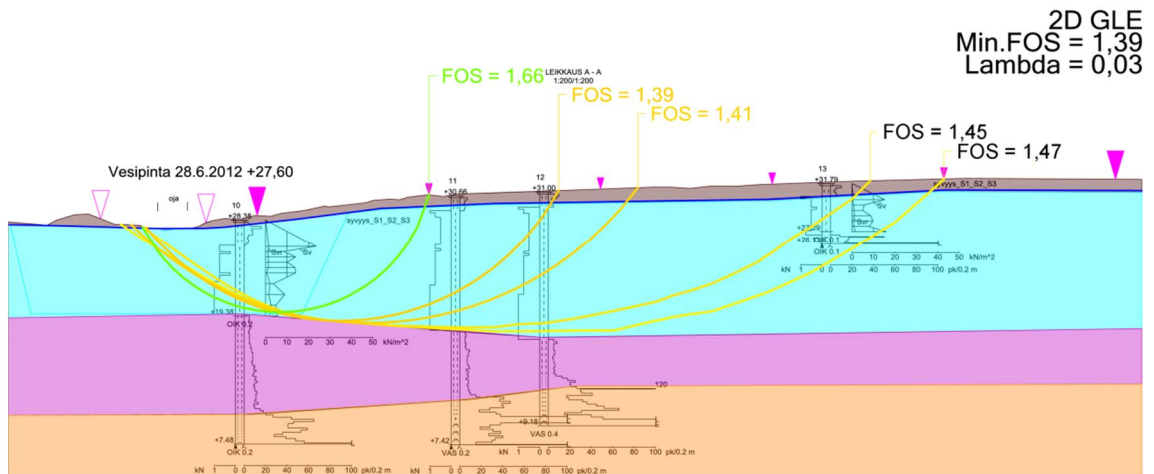
1. Suljetulla leikkauslujuudella laskenta
2. Tehokkailla parametreilla laskenta
3. Tehokkailla parametreilla ja huokospaineen kasvulla laskenta
4. Vertailulaskenta Plaxis-ohjelmalla

1. Suljetulla leikkauslujuudella laskenta

Suljetulla leikkauslujuudella laskettaessa leikkauslujuutena on käytetty siipikairalla määritetyistä leikkauslujuuksista määritettyä keskimääräistä leikkauslujuutta. Kohteella määritetyt leikkauslujuudet ovat pienimmillään varsin alhaisia, eivätkä muut tutkimukset tue määritettyjä lujuuksia. Keskimääräisenä leikkauslujuutena käytetään 10 kPa.



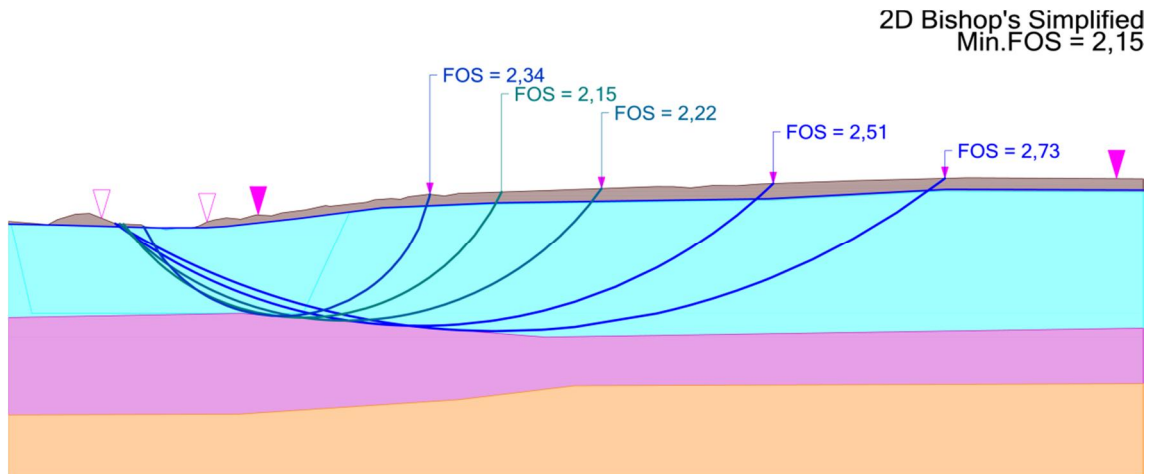
Kuva 7.26. Lasketut 5 liukupintaa Bishopin menetelmää ja suljettua leikkauslujuutta käyttäen.



Kuva 7.27. Laskettu 5 liukupintaa GLE menetelmää ja suljettua leikkauslujuutta käyttäen.

Suljetuilla leikkauslujuuksilla laskettaessa vaadittavaa 1,8 varmuutta ei saavuteta millään kohdin n. 80 metrin levyisen tarkastelualueen matkalla. Alimmillaan varmuus on noin 35 m etäisyydellä Vallinojasta, Bishopin menetelmällä kokonaisvarmuudeksi murtumista vastaan saadaan 1,36 ja GLE menetelmällä 1,39.

Vertailun vuoksi laskettiin myös tapaus, jossa suljetun leikkauslujuuden arvioidaan kasvavan luvussa 5 esitetyn kaavan 5.1 mukaisesti. Tällöin leikkauslujuus kasvaisi n. 1,2 kPa metriä kohden. Tulokset on esitetty kuvassa 7.28.

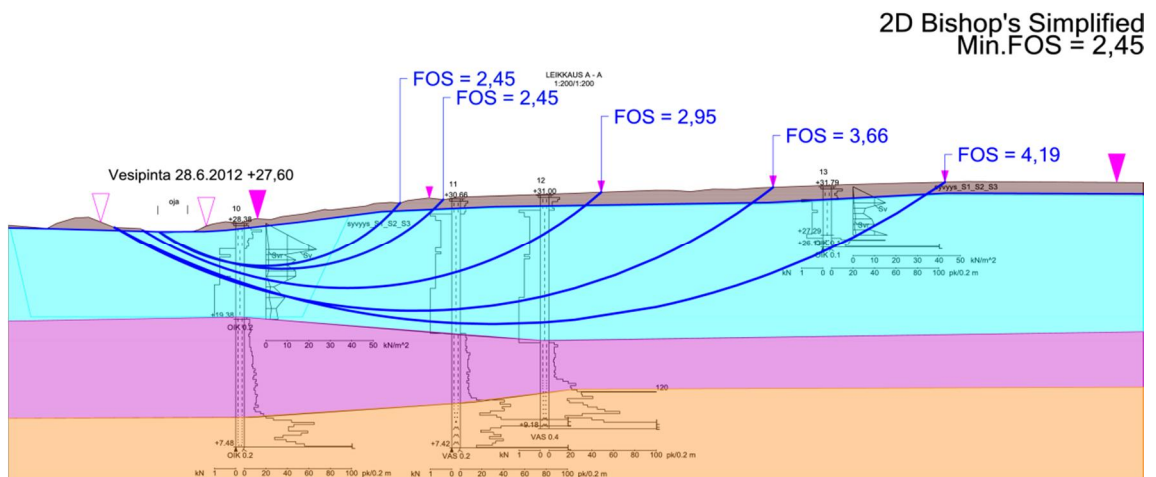


Kuva 7.28. Lasketut 5 liukupintaa Bishopin menetelmällä ja kasvavaa leikkauslujuutta käyttäen.

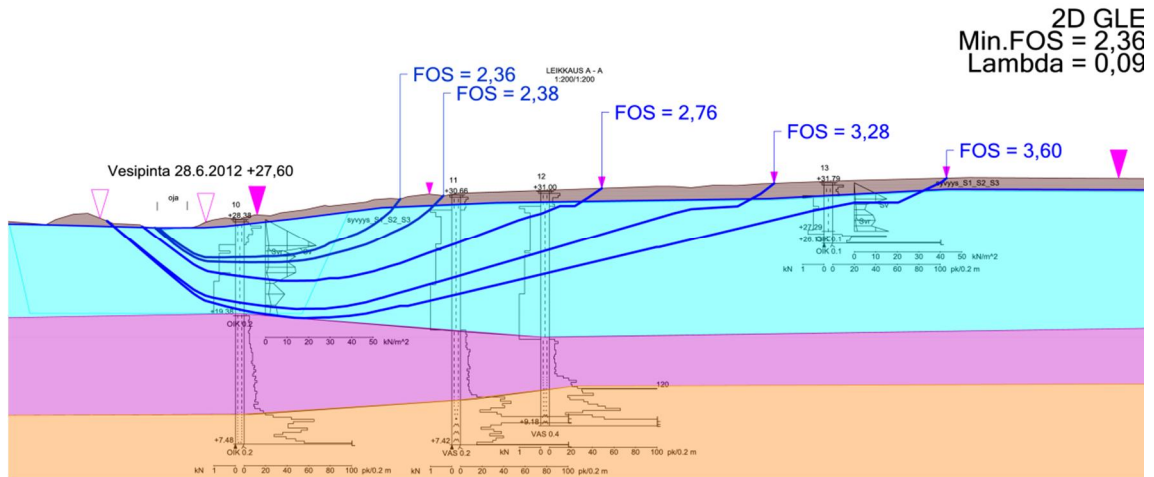
Kuvassa 7.28 nähdään kuinka suuri merkitys kokonaisvarmuuteen on, mikäli saven lujuuden kasvu onnistuttaisiin todentamaan pohjatutkimuksilla. Tilanne on laskettu esi-merkin vuoksi. Saven lujuus ei aina kasva, tai on mahdollista että maassa on heikompia kerroksia.

2. Tehokkailla parametreilla laskenta

Tehokkailla parametreilla laskenta perustuu luvussa 6 määritettyihin tehokkaisiin laskentaparametreihin. Laskelmissa ei ole huomioitu huokospaineen kasvua vaan laskelmat on tehty pelkästään kitkakulman arvoon perustuen.



Kuva 7.29. Lasketut 5 liukupintaa Bishopin menetelmällä tehokkaita lujuusparametreja käyttäen.

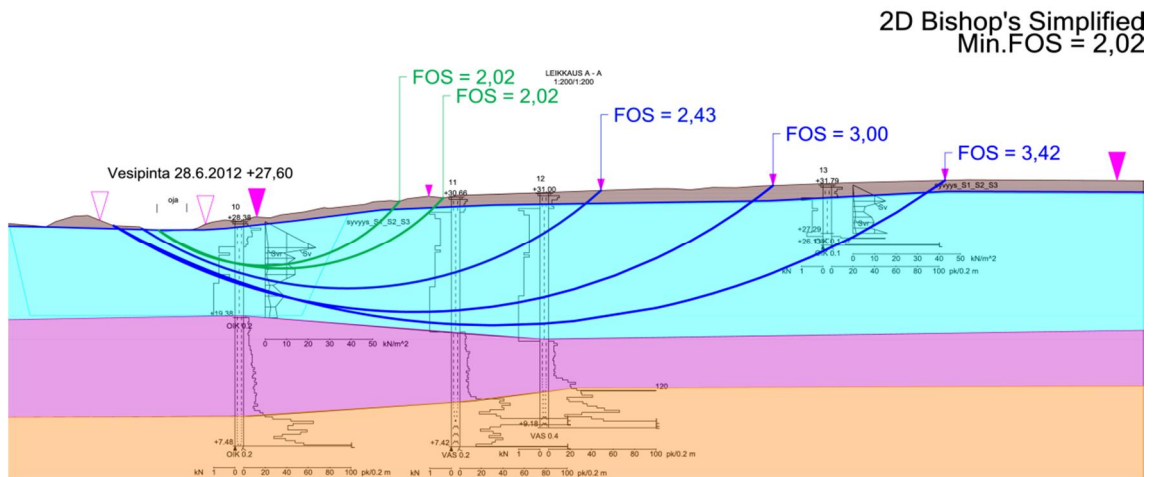


Kuva 7.30. Lasketut 5 liukupintaa GLE menetelmällä tehokkaita lujuusparametreja käyttäen.

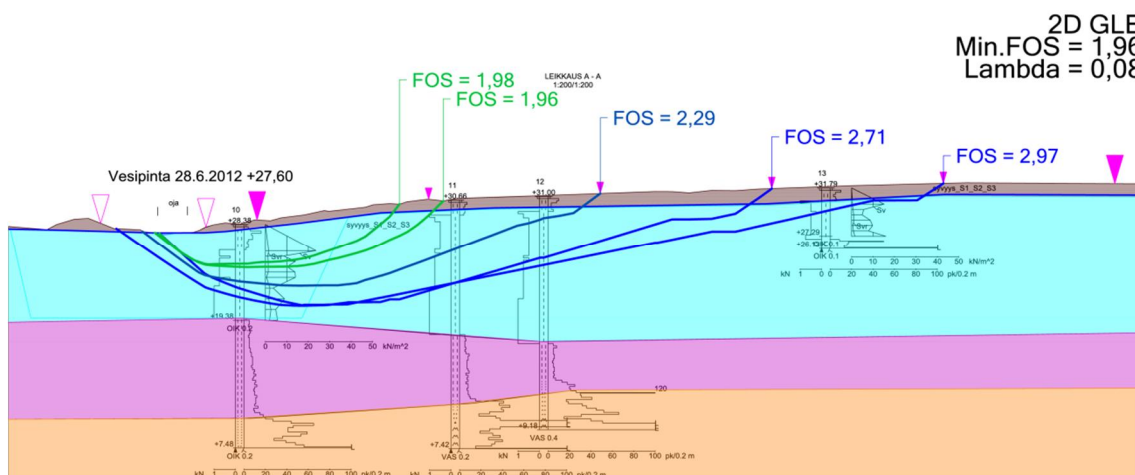
Tehokkailla parametreilla laskettaessa vaadittava 1,8 varmuus saavutetaan kaikkialla tarkastelualueella. Bishopin menetelmällä kokonaisvarmuudeksi saadaan alimmillaan 2,45 ja GLE menetelmällä 2,36.

3. Tehokkailla parametreilla ja huokospaineen kasvulla laskenta

Tehokkaiden parametrien lisäksi laskelmissa huomioidaan savessa tapahtuva huokospaineen kasvu. Käytettävä huokospaineparametri on määritetty kuvan 4.8 taulukosta.



Kuva 7.31. Lasketut 5 liukupintaa Bishopin menetelmällä tehokkaita lujuusparametreja käyttäen ja huokospaineen kasvu huomioiden.

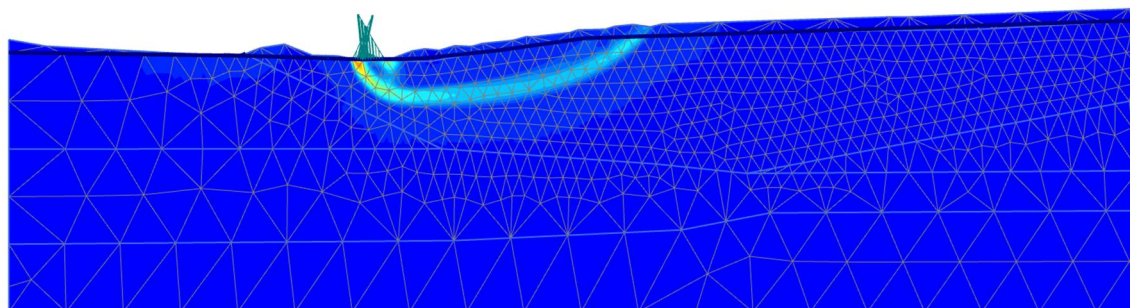


Kuva 7.32. Lasketut 5 liukupintaa GLE menetelmällä tehokkaita lujuusparametreja käyttäen ja huokospaineen kasvu huomioiden.

Huokospaineaparametrilla laskettaessa varmuudet tipahtavat selvästi ilman huokospaineparametria tehtyihin laskentoihin verrattuna. Kaikkialla tarkastelualueella ylitetään kuitenkin yhä 1,8 vaadittava varmuustaso. Bishopin menetelmällä määritettiin alimmillaan 2,02 ja GLE menetelmällä 1,96 kokonaisvarmuudet.

4. Vertailulaskelmat PLAXIS-ohjelmalla

Vertailulaskelmat tehtiin Plaxis-ohjelmalla samoilla tehokkailla parametreilla kuin Geocalc laskelmat. Vallinojan tapauksessa liukupintaohjausta ei tarvinnut tehdä sillä vaarallisin liukupinta ohjautui itsestään varsin uskottavaksi. Määritetty liukupinnan sijainti on esitetty kuvassa 7.37.



Kuva 7.33. Plaxis- ohjelmalla määritetty vaarallisimman liukupinnan sijainti A-A leikkauksessa.

Plaxis- ohjelmalla määritetty vaarallisin liukupinta vastaa muodoltaan ja sijainniltaan varsin hyvin Geocalc- ohjelmalla määritettyyn vaarallisimpaan liukupintaan, mikä on määritetty käyttäen tehokkaita parametreja ja huokospaineparametria. Plaxisella määritetylle liukupinnalle saadaan ohjelman Safety- laskennalla varmuuskertoimeksi 1,92. Kaikki lasketut tapaukset ja niiden tuottamat varmuuskertoimet ovat esitetty taulukossa 7.6.

Taulukko 7.6. Vallinojan leikkauksesta A-A määritetyt varmuuskertoimet eri laskentatapauksille.

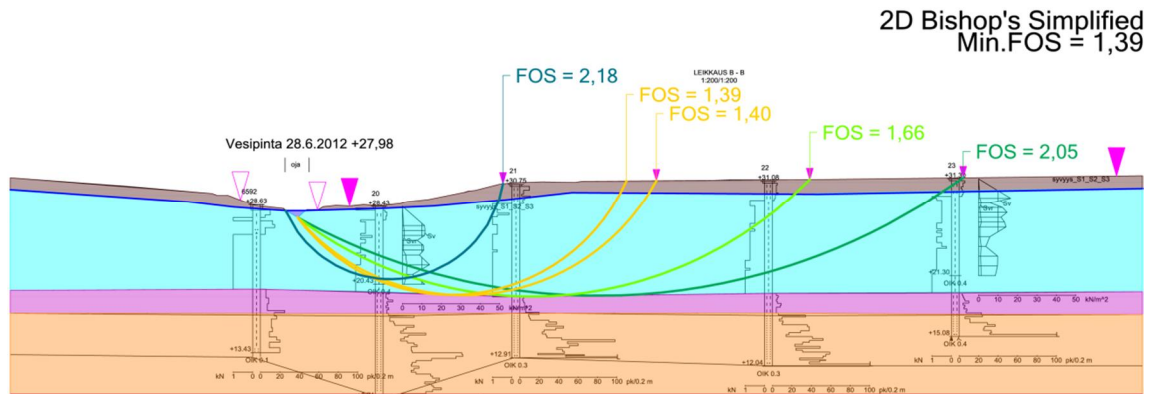
Laskentamenetelmä		Bishop	GLE
tutkitun liukupinnan muoto		Ympyrä	Vapaa
Su-parametreilla			
1 Su-parametreilla		1,62	1,66
		ei toteudu	ei toteudu
Kitkakulmalla			
2 Ilman huokospaineen kasvua		2,45	2,36
		kaikkialla	kaikkialla
3 Huokospaineen kasvu huomioiden		2,02	1,96
		kaikkialla	kaikkialla
PLAXIS			
4 M-C-materiaalimallilla		1,92	
	SS- materiaalimallilla	1,77	
	Varmuus sortumista vastaan 20 m etäisyydeltä joesta		
	Etäisyys joesta, jolla 1,8 varmuustaso saavutetaan [m]		

Vallinojalla tuloksissa havaitaan konkreettisesti siipikairauksilla määritettyjen lujuusparametrien ongelmallisuus. Vaikka laskelmissa ei käytetä edes aivan matalimpia leikkauslujuuksien arvoja, ei tarkastelussa saavuteta vaadittavaa varmuustasoa missään tarkastelualueen leveydellä. Plaxis laskennassa ja Geocalc-laskennassa vaarallisin liukupinta sijoittuu samalle etäisyydelle ojasta. Lähimmäksi vertailulaskelman varmuutta päästään tilanteessa jossa laskenta tehdään tehokkailla lujuusparametreilla huokospaineparametria käyttäen ja GLE menetelmällä vapaalla liukupinnalla laskettaessa.

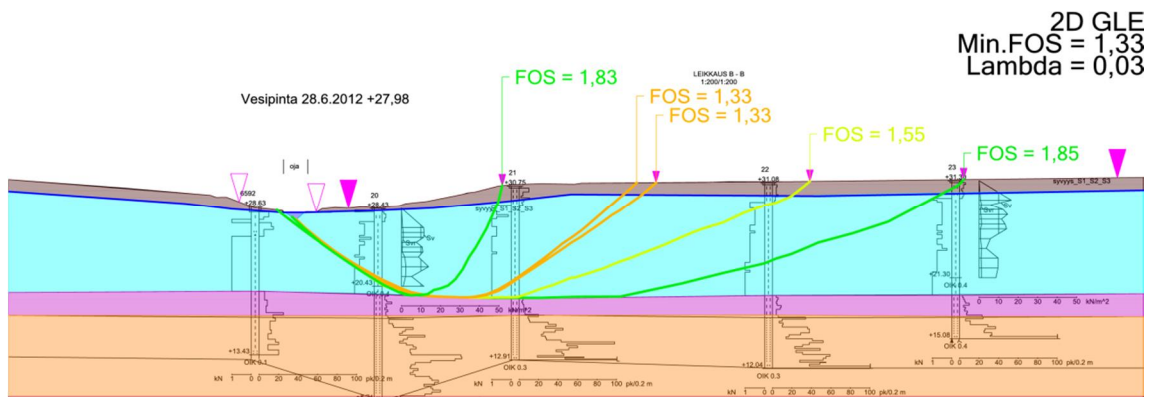
7.4.2 Leikkaus B-B

Vallinojalla on tutkittu myös toista leikkausta B-B, n. 200 metriä leikkauksesta A-A pohjoiseen. Pohjatutkimusten perusteella pohjasuhteet alueella on varsin tasaiset, eikä poikkileikkausten geometriassa ole suuria eroavaisuuksia. Tämän vuoksi B-B leikkausta on tarkasteltu ainoastaan A-A leikkauksessa tehtyjen tarkastelujen pohjalta. Tarkastelut on tehty ainoastaan kriittisimmillä laskentatapauksilla.

1. Suljetulla leikkauslujuudella laskenta



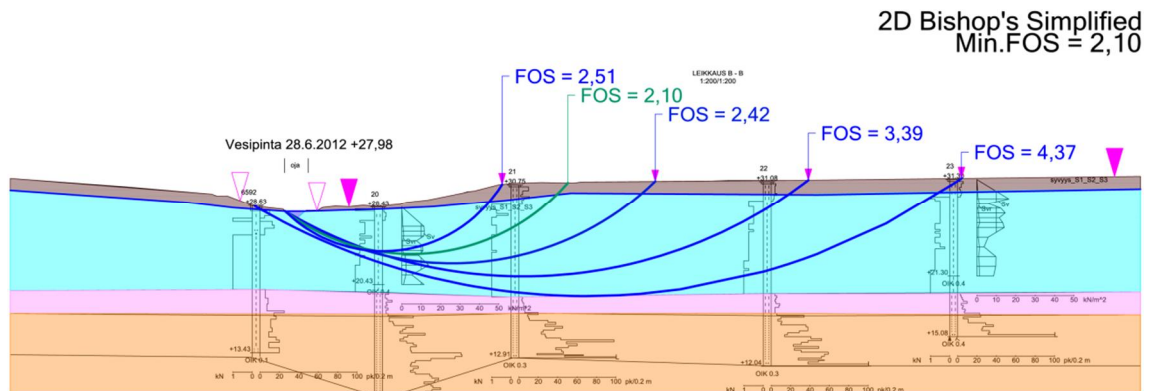
Kuva 7.34. Lasketut 5 liukupintaa Bishopin menetelmällä suljettua leikkauslujuutta käyttäen.



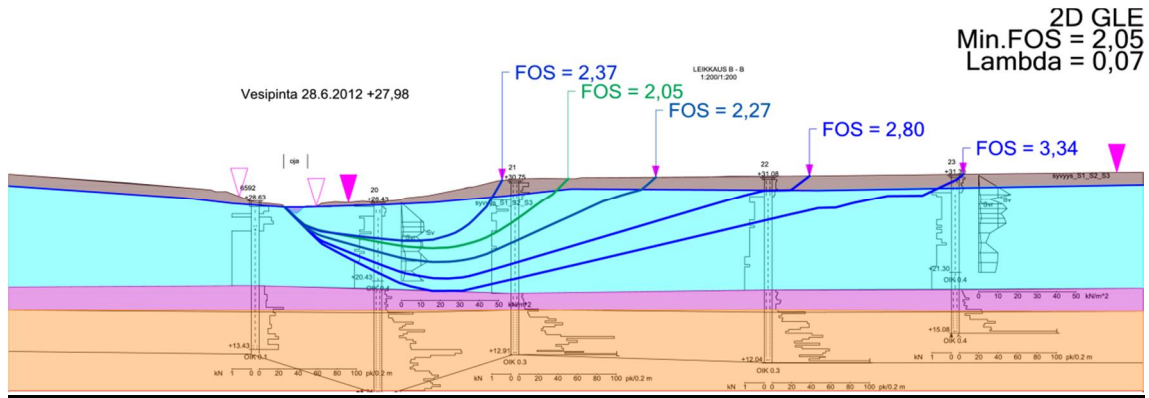
Kuva 7.35. Lasketut 5 liukupintaa Bishopin menetelmällä suljettua leikkauslujuutta käyttäen.

Bishopin menetelmällä varmuus tutkitulla alueella on matalimmillaan 1,39 ja GLE menetelmällä 1,33.

2. Tehokkailla parametreilla ja huokospaineen kasvulla laskenta



Kuva 7.36. Lasketut 5 liukupintaa Bishopin menetelmällä, tehokkaita parametreja käyttäen ja huokospaineenkasvu huomioiden.



Kuva 7.37. Lasketut 5 liukupintaa GLE menetelmällä, tehokkaita parametreja käyttäen ja huokospaineenkasvu huomioiden.

Bishopin menetelmällä varmuus tutkitulla alueella on matalimmillaan 2,10 ja GLE menetelmällä 2,05.

Taulukko 7.7. Tulosten vertailua Vallinojan B-B leikkauksesta tehdyistä laskennoista.

Laskentamenetelmä	Bishop	GLE
tutkitun liukupinnan muoto	Ympyrä	Vapaa
Su-parametreilla		
1 Su-parametreilla	1.39	1.33
	n. 60 m	n. 65 m
Kitkakulmalla		
4 Huokospaineen kasvu huomioiden	2.10	2.05
	<20m	<20m
Varmuus sortumista vastaan 30 m etäisyydeltä joesta		
Etäisyys joesta, jolla 1,8 varmuustaso saavutetaan [m]		

Tulokset ovat B-B-leikkauksessa odotetusti hyvin samankaltaisia A-A-leikkauksen tulosten kanssa. A-A-leikkauksesta poiketen kaikissa tarkasteluissa pystytään määrittämään 1,8 varmuustasoa vastaava etäisyys ojasta.

7.5 Tammisto

Tammiston laskelmat perustuvat aikaisemmin tehtyihin pohjatutkimuksiin ja tässä työssä määritettyyn arvioon alueen saven kitkakulmasta. Laskelmissa käytetyt parametrit maakerroksittain on esitetty taulukossa 7.8.

Taulukko 7.8. Tammiston kohteella käytetyt laskentaparametrit maakerroksittain.

TAMMISTO		Tilavuus-paino	Koheesio	Kitka-kulma	Suljettu leikkauslujuus	Lujuuden kasvu	Huokospaine-parametri
LASKENTAPARAMETRIT		γ kN/m ³	c' kPa	ϕ' kPa	S_u kPa	$\Delta s_u/m$	ru'
	Kuivakuori	17	0	0	30		0
	Savi	15	0	24	10		0.2
	lujittunut savi	15	0	24	20		0.1
	Siltti	17	0	28	0		0
	Pohjamaa	18	0	34	0		0

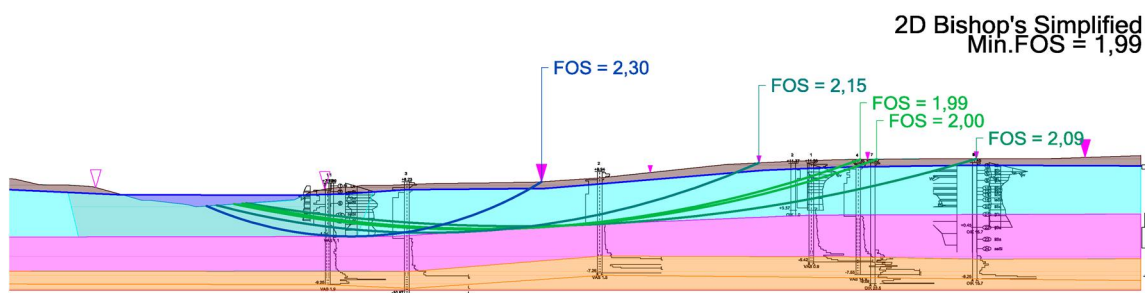
Tammistosta laskelmia on tehty suljettuun leikkauslujuuteen ja tehokkaisiin parametreihin perustuen. Laskelmissa on vertailtu seuraavia laskentatapauksia:

1. Suljetulla leikkauslujuudella laskenta, ilman lujittumista
2. Suljetulla leikkauslujuudella laskenta, lujittuminen huomioon.
3. Tehokkailla parametreilla laskenta lujittuminen ja huokospaineparametri huomioiden.
4. Vertailulaskelma Plaxis- ohjelmalla.

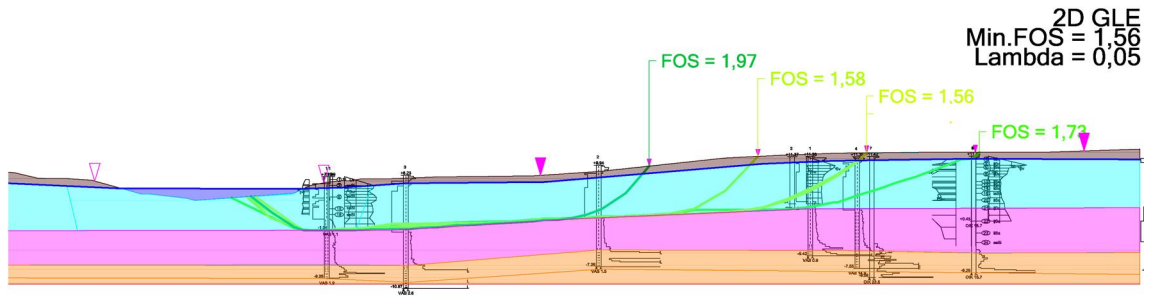
Koska Tammiston kohteelta ei kolmiaksisiaalikoetta ole tehty, on tehokkaat laskentaparametrit arvioitu muilta kohteilta tehtyjen kolmiaksisiaalikoekokeiden perusteella.

1. Suljetulla leikkauslujuudella laskenta, ilman lujittumisen huomiointia.

Suljetulla leikkauslujuudella laskut on tehty käyttäen savikerroksessa siipikairauksilla määritetty 10 kPa suljettua leikkauslujuutta.



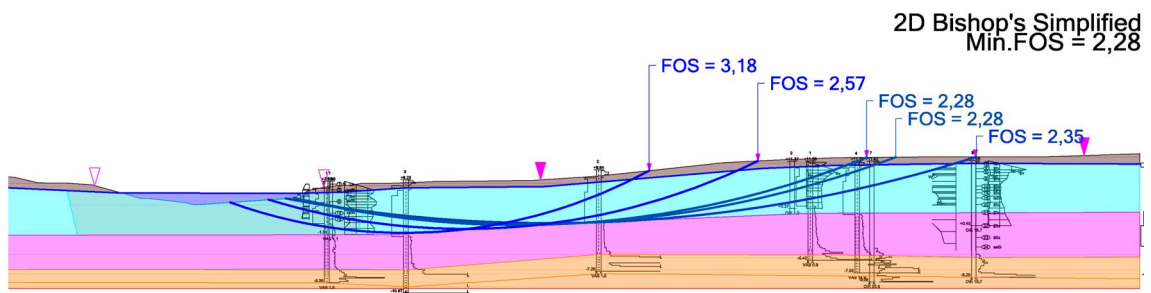
Kuva 7.38. Lasketut 5 liukupintaa Bishopin menetelmällä ympyräliukupintaa ja suljettua leikkauslujuutta käyttäen.



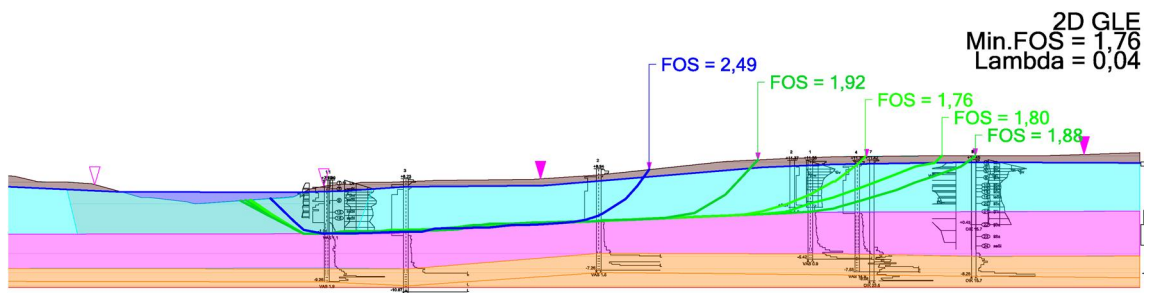
Kuva 7.39. Lasketut 5 liukupintaa GLE menetelmällä, vapaata liukupintaa ja suljettua leikkauslujuutta käyttäen.

Laskelmissa huomataan liukupinnan muodon merkitys silloin, kun poikkileikkauksen geometria on yhtään monimutkaisempi. Bishopin menetelmällä ympyräliukupinnalla pienin varmuus tutkitavalla alueella on 1,99 ja GLE menetelmää ja vapaata liukupintaa käytettäessä varmuus on 1,56.

2. Suljetulla leikkauslujuudella laskenta, lujittuminen huomioiden



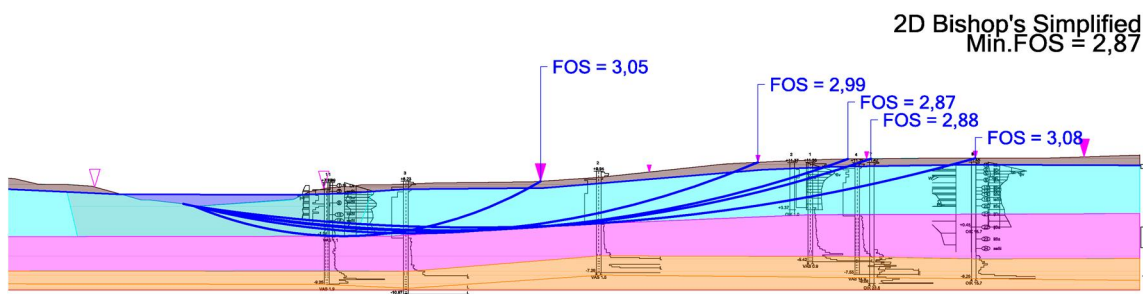
Kuva 7.40. Lasketut 5 liukupintaa Bishopin menetelmällä ympyränmuotoista liukupintaa ja suljettua leikkauslujuutta käyttäen, sekä jokipenkereen lujittuminen huomioiden.



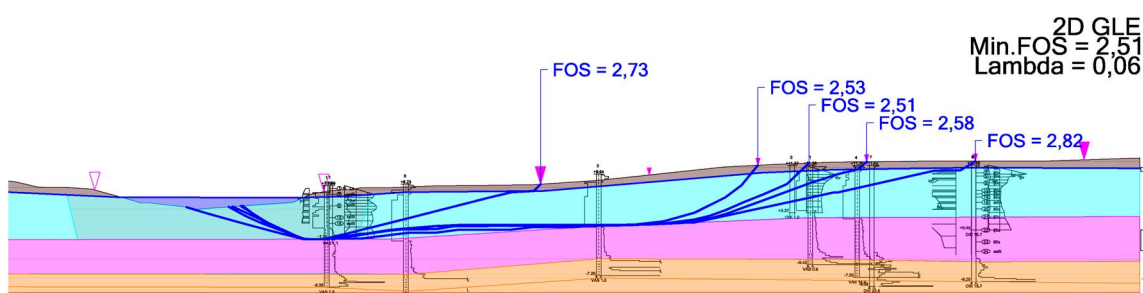
Kuva 7.41. Lasketut 5 liukupintaa GLE menetelmällä vapaata liukupintaa ja suljettua leikkauslujuutta käyttäen, sekä jokipenkereen lujittuminen huomioiden.

Bishopin menetelmällä varmuus tutkitulla alueella on matalimmillaan 2,28 ja GLE menetelmällä 1,76.

3. Tehokkailla parametreilla laskenta, lujittuminen ja huokospaineen kasvu huomioiden.



Kuva 7.42. Lasketut 5 liukupintaa Bishopin menetelmällä vapaata liukupintaa ja tehokkaita parametreja käyttäen, sekä huokospaineen kasvu ja lujittuminen huomioiden.

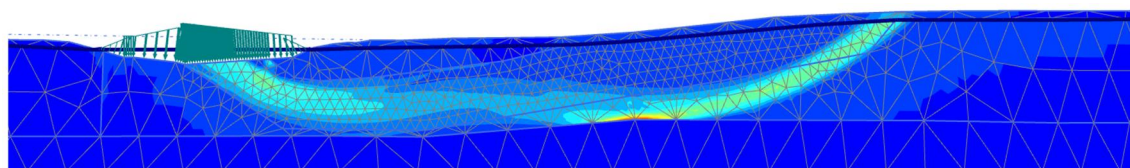


Kuva 7.43. Lasketut 5 liukupintaa GLE menetelmällä vapaata liukupintaa ja tehokkaita parametreja käyttäen, sekä huokospaineen kasvu ja lujittuminen huomioiden.

Bishopin menetelmällä varmuus tutkitulla alueella on matalimmillaan 2,87 ja GLE menetelmällä 2,51.

4. Vertailulaskennat Plaxis-ohjelmalla.

Plaxis- ohjelmalla vaarallisinta liukupintaa on tutkittu käyttämällä tehokkaita parametreja. Poikkileikkauksessa vaarallisimmaksi muodostunut liukupinta on esitetty kuvassa 7.39. Varmuus murtumista vastaan esitetyllä liukupinnalla on 2,55.



Kuva 7.44. Plaxis- ohjelmalla määritetty vaarallisin liukupinta, varmuus murtumista vastaan 2,55.

Vertailemalla eri menetelmin ja parametrein määritettyjä liukupintoja nähdään niissä varsin suuriakin eroja. Laskettaessa GLE- menetelmällä kitkakulmaa ja huokospaineparametria käyttäen sekä jokipenkereen lujittuminen huomioiden, vastaa vaarallisin liukupinta varsin tarkasti Plaxis- ohjelmalla määritettyä vaarallisinta liukupintaa. Liukupinnoille laskettujen varmuuksien välinen poikkeama on 0,04. Ainakin Tammiston kohteel-

la näyttäisi, että huokospaineparametrin käyttö yhdessä vapaan liukupinnan kanssa olisi tehtyjen laskelmien perusteella paras laskentamenetelmä.

Taulukko 7.9. Laskettuja varmuuskertoimet eri laskentamenetelmillä ja parametreilla

Laskentamenetelmä		Bishop	GLE
tutkitun liukupinnan muoto		Ympyrä	Vapaa
Su-parametreilla			
1	Su-parametreilla, ilman lujittumista	1,99 kaikkialla	1,56 n. 125 m
2	Su-parametreilla, lujittuminen huomioiden	2,28 kaikkialla	1,76 n. 112 m
Kitkakulmalla			
3	Huokospaineen kasvu ja lujittuminen huomioiden	2,87 kaikkialla	2,51 kaikkialla
PLAXIS			
4	MC-materiaalimallilla	2,55	
	SS-materiaalimallilla	> 2,0	
	Varmuus sortumista vastaan 95 m etäisyydeltä joesta		
	Etäisyys joesta, jolla 1,8 varmuustaso saavutetaan [m]		

Parhaiten tosiaan vastaavat varmuuskertoimet saadaan laskentamenetelmällä 3 ja 4. Huomattava ero on myös liukupinnan muodolla, Laskentatapauksessa 1 ja 2 tämä ero on selkeimmin havaittavissa.

8 YHTEENVETO

8.1 Yleistä

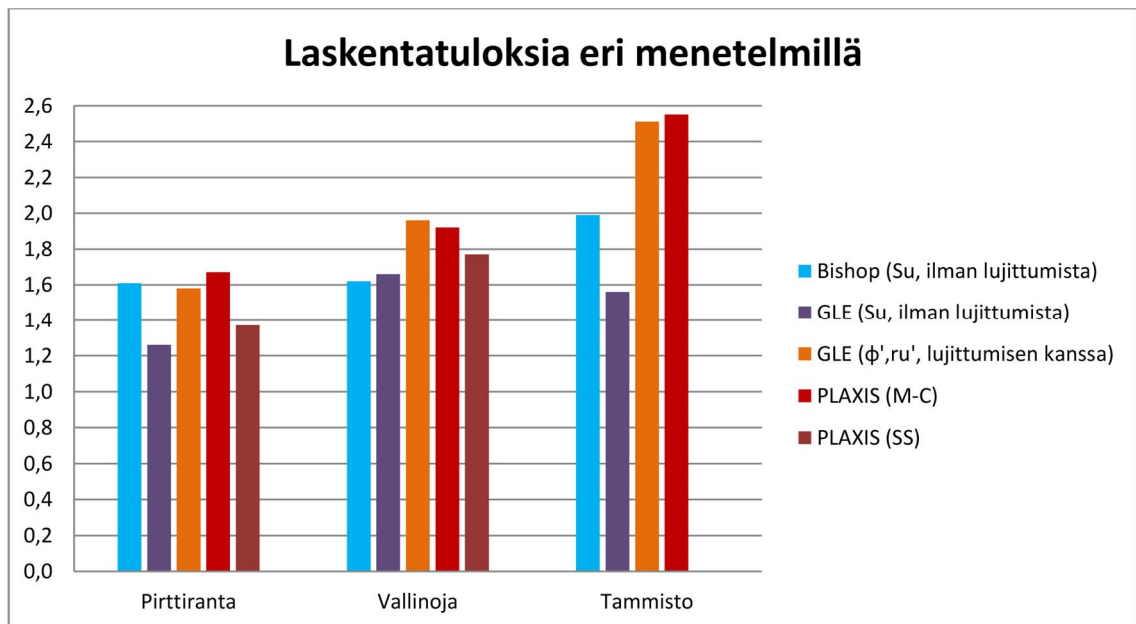
Tehtyjen pohjatutkimusten ja laskentojen perusteella voidaan tehdä johtopäätöksiä sopivimmista laskentamenetelmistä, mutta myös erottaa joitakin selkeitä Vantaan alueen ominaispiirteitä. Ominaispiirteiden tiedostaminen lisätutkimuksien ohjelmointivaiheessa on olennaista, jotta tutkimuksista saadaan mahdollisimman paljon todenmukaista informaatiota. Vantaan jokilaaksoille tyypillisiksi piirteiksi voidaan tämän työn yhteydessä tehtyjen tutkimusten perusteella nimetä ainakin seuraavat kohdat:

- Jokipenkereet ovat jossain määrin lujittuneet. Ödometrikokeella savikerroksesta määritetyissä konsolidaatiojännityksissä on jokipenkereellä havaittu vaihtelevia, 10...50 kPa ylikonsolidaatiojännityksiä.
- Siipikairaukset jokipenkereeltä tuottavat useasti suurempia suljetun leikkauslujuuden arvoja, kuin kauempaa joesta tehtyt siipikairaukset. Syynä tähän voi olla edellisessä kohdassa mainittu jokipenkereen lujittuminen tai saven häiriintymis-herkkyyden kasvu siirryttäessä joesta kauemmaksi.
- Savikerros on kerroksellista ja savikerroksessa kulkee ohuita silttikerrostumia. Yksittäisiä laboratoriotuloksia tarkasteltaessa tämä voi aiheuttaa vääristymää tuloksiin.
- Tehdyissä kolmiakselialikokeissa saven kriittinen kitkakulma ($c'=0$) on ollut vähintään $24^{\circ(*)}$, kohteesta riippumatta. Tämä ei kuitenkaan takaa etteikö se jossain voisi olla pienempi.

(* Voidaan käyttää alustavissa tarkasteluissa, tehtäessä varsinaisia stabiliteettitarkasteluja parametrit määritettävä laboratoriossa.

Jokilaakson maaperä koostuu pääosin paksusta, laihasta tai lihavasta savesta muodostuvasta maakerroksesta. Runsassavisen maaperän vakavuustarkasteluissa huokospaineen merkitys on hyvin suuri. Eri laskentamenetelmiä vertailtaessa itse menetelmän ja parametrien lisäksi olennaista on myös tutkittavan liukupinnan muoto. Tavallisesti tarkasteltava ympyränmuotoinen liukupinta voi johtaa paikoin hyvinkin suuriin varmuuden yliarviointeihin. Vertailulaskelmia tehtiin Plaxis- ohjelmalla, jonka kanssa tarkasteluissa ei liukupinnan sijaintia tai muotoa voi määrätä, vaan tarkastellaan yksittäisiä laskentapistettä ja tehdään analysointi tarkastelemalla pisteiden luomaa kokonaisuutta. Tällöin laskelman tuottamaa liukupinnan muotoa ja sijaintia voidaan käyttää vertailukohtana yksinkertaisemmille laskennoille.

Pohjatutkimusten tekeminen savikoilla, savisten näytteiden tutkiminen ja stabiliteettilaskennat ovat ongelmallisia. Kairausten tekeminen ja maanäytteiden ottaminen maata häiritsemättä on hankalaa tai paikoin mahdotonta tavallisesti käytetyllä näytteenottimella (STII). Laskelmissa hankaluutta tuottaa se, ettei maan käyttäytymistä osata mallintaa tarkasti vaan aina päädytään jonkinasteisiin yksinkertaistuksiin tai oletuksiin. Vaikka laskennoissa käytettäisiin mahdollisimman tarkkoja menetelmiä ja monimutkaisia laskelmia, on laskelmien todenmukaisuus korkeintaan niin hyvä kun on tutkimuksin määritetyt laskentaparametrien todenmukaisuus. Kuvassa 8.1 on kerätty olennaisimmat laskentatulokset kolmelta eri kohteelta neljällä eri laskentamenetelmällä. Tuloksista voidaan huomata vapaan liukupinnan ja suljetun leikkauslujuuden yhdistelmänä tehdyn laskelman tuottavan kauttaaltaan heikompia tuloksia muihin laskentamenetelmiin verrattuna. Huokospaineparametria käyttäen tehdyt laskelmat sen sijaan korreloivat Plaxis- tarkasteluja varsin tarkasti.



Kuva 8.1. Keskeisimmät laskentatulokset eri menetelmillä.

Tammiston osalta Soft Soil- materiaalimalliin perustuvaa kokonaisvarmuuden määrittäystä ei pystytty yli 2,0 varmuustasolla tarkasti tekemään joten se on jätetty pois vertailusta. Tehtyjen esimerkkilaskelmien mukaan laskelmat olisi suositeltavaa tehdä tehokkaita parametreja käyttäen, huokospaineen kasvu huomioiden ja liukupinnan muotoa rajoittamatta. Tehokkaiden parametrien käyttö vaatii kolmiaksaalikokeen tekemistä kohteelta.

8.2 Suositus ohjeen sisällöstä

8.2.1 Pohjatutkimusten määrän ja menetelmien arviointi

Alueella jonka stabiliteettia tutkitaan, tulee pohjatutkimuksia tehdä kohteesta riippuen siinä määrin, että tutkimusten voidaan katsoa kattavan riittävällä tarkkuudella koko tutkimusalueen. Tutkimusten määrää ja sijaintia tulee tarkastella ensisijaisesti alueen topografian ja tulevien rakennelmien sijainnin perusteella. Olennaista on arvioida alueelta stabiliteetin kannalta kriittisimmät kohdat, ja tunnistaa esimerkiksi jo tapahtuneita sortuma, jyrkkiä pengertuiskia, maan siirtymiä ja erilaisia maan liikkeitä aiheutuneita muutoksia. Pohjatutkimuksia suositellaan tehtäväksi sekä jokipenkereeltä että kauempaa joesta. Järkevää olisi valita alueen koosta riippuen tutkittavia leikkauksia ja suunnitella tehtävät pohjatutkimukset leikkauslinjojen välittömään läheisyyteen. Mikäli käytössä on maastotietokantaa alueen topografiasta, olisi järkevää tehdä alustava stabiliteettitarkastelu seuraavilla lähtöoletuksilla:

1. Kuivakuorikerros 1m paksuinen ($S_u=30$ kPa)
2. kuivakuorikerroksen alapuolella 8m paksu savikerros ($S_u=10$ kPa)
3. savikerroksen alapuolella 1m paksuinen silttikerros ($\phi=28^\circ$)
4. pohjavesi 1m syvyydessä maan pinnasta
5. joen vesipinta keskimääräisellä tasolla (jokien vedenpinnankorkeustietoa saatavissa www.ymparisto.fi).
6. Laskentamenetelmä; Geocalc, GLE, vapaa liukupinta.

Kun laskelma tehdään mainituilla karkeilla lähtöoletuksilla käyttäen vallitsevaa poikkeileikkausta, voidaan nähdä kuinka herkkä alue stabiliteetin kannalta on. Mikäli lähtöarvoilla päästään vaadittuun varmuuden tavoitetasoon, voidaan pohjatutkimusmenetelmänä käyttää lähtökohtaisesti paino- ja siipikairausta lujuuden määrittämiseen. Mikäli ensimmäisen vaiheen laskelmat jäävät tavoitetasosta, voi tehdä toisen vaiheen laskelman tehokkailla parametreilla. Tällöin saven laskentaparametreiksi vaihdetaan suljetun leikkauslujuuden sijasta $c' = 0$, $\phi = 24^\circ$, $r_u' = 0,20$. Mikäli näilläkin laskentaparametreilla jäädyään selvästi halutusta varmuustasosta halutulla etäisyydellä, on rakentaminen ilman vahvistustoimenpiteitä todennäköisesti erittäin hankalaa. Jos tehokkailla parametreilla laskenta tuottaa halutun varmuustason, on häiriintymättömän näytteen otto ja kolmiak-siaalikoekiden tekeminen kannatettavaa.

8.2.2 Pohjatutkimusmenetelmät

Pohjatutkimuksissa suositeltavaa on käyttää painokairausta maalajirajojen selvittämiseksi. Lujuusominaisuuksien selvittämiseen voidaan käyttää siipikairausta, mutta tällöin voidaan saada huomattavasti todellisuutta matalampia maan suljetun leikkauslujuuden arvoja. Mikäli tutkittavalla kohteella riittävä stabiliteetti saavutetaan siipikairatuilla lujuuksilla, on tämäkin tutkintamenetelmä riittävä. Siipikairauksia tehdessä tulee jokipen-

kereen mahdollinen lujittuminen huomioda tekemällä kairaukset sekä jokipenkereeltä (<10m joesta) sekä kauempaa joesta (<50m joesta). Mikäli tehdään vain yksi siipikairaus, tehdään se kauempaa joesta. Siipikairatuloksista lujisuuden määrittäminen tehdään jakamalla savikerros siipikairadiagrammin mukaisesti kerroksiin. Mikäli siipikairalla määritetään suljettu leikkauslujuus ilman huomattavaa syvyyden funktiona tapahtuvaa muutosta, määritetään koko savikerrokselle vakio leikkauslujuuden arvo. Jokipenkereeltä mahdollisesti kairattua suurempaa leikkauslujuutta voidaan käyttää jokiuoman muodosta riippuen enintään 15 metrin etäisyydellä joesta.

Suosittelavampi tapa määrittää laskentaparametrit on ottaa alueelta häiriintymätön näytesarja ja tehdä painokairauksen perusteella savikerroksen puolivälistä ödometrija kolmiaksiaalikoel. Kokeiden perusteella määritetään savelle kitkakulman arvo ϕ' ($c'=0$) ja kuvasta 4.8. käytettävä huokospaineparametri r_u' . Koheesion käyttämistä stabiiliteettilaskelmissa ei suositella, sillä koheesion määrittäminen on vaikeaa. Tulvaherkällä alueella koheesion varaan laskeminen on epävarmalla pohjalla.

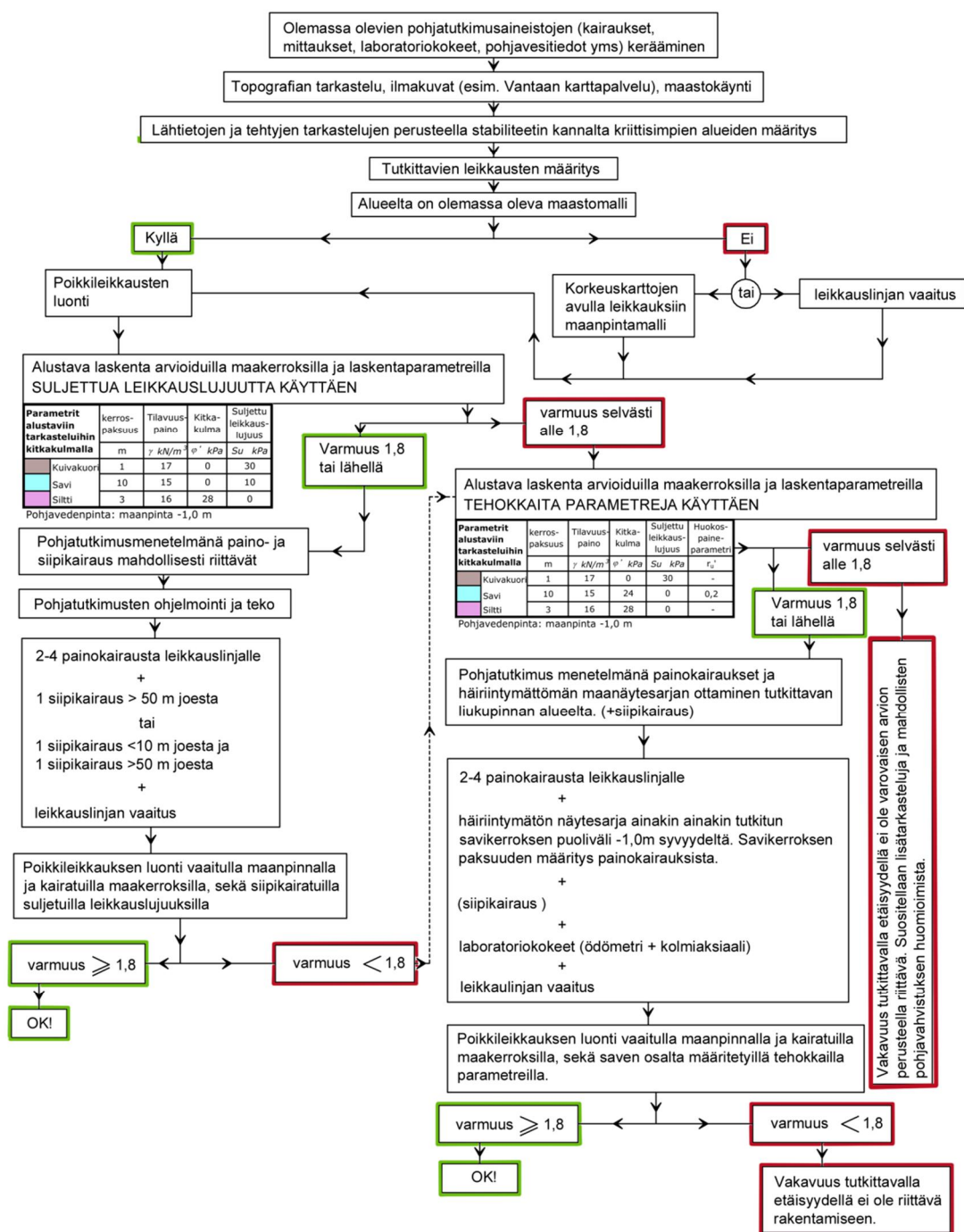
8.2.3 Laskentamenetelmät

Esimerkkilaskelmissa vertailtiin erilaisia laskentamenetelmiä ja liukupintoja. Geometriasta riippuen tutkittavan liukupinnan muodolla voi olla suurikin merkitys laskelmien lopputuloksiin. Käytettäessä Geocalc- laskentaohjelmaa, kuten tässä työssä on tehty, on liukupinnan muodoksi suositeltavaa valita vapaamuotoinen liukupinta ja laskentamenetelmäksi GLE- menetelmä. Perinteisesti etenkin alustavissa tarkasteluissa on suosittu ympyräliukupintaa mutta sille ei nykyisillä laskentaohjelmilla löydy perusteita. Vaikka monimutkaisemmat menetelmät vievät hieman enemmän aikaa laskennoissa, eivät erot ole kovinkaan merkityksellisiä. Ympyräliukupintaa voidaan edelleen käyttää vertailulaskentana.

8.2.4 Stabiiliteettitarkastelun toimintamalli

Kuvassa 8.3 on esitetty tehtyjen havaintojen perusteella laadittu kulkukaavio, Vantaan kaupungin alueella tehtäville jokiuomien stabiiliteettitarkasteluille. Kaavio osoittaa kuinka olemassa olevia yleisiä pohjasuhdetietoja voidaan hyödyntää tarkastelujen tekemisessä ja tarvittavien tutkimusten määrän arvioinnissa. Pohjatutkimuksiin voidaan suositella panostettavan mikäli alustavissa tarkasteluissa voidaan todeta niillä mahdollisesti päästäviin parempiin tuloksiin. Etenkin kun halutaan rakentaa tehokkaasti ja hyödyntää maaperän todellinen lujuus. Tämä ei tarkoita, että maaperä olisi aina kevyiden tutkimusten osoittamaa lujuutta suurempi, mutta se on mahdollista. Laadittu kulkukaavio ohjaa tekemään tarpeellisia pohjatutkimuksia, ja auttaa arvioimaan pohjatutkimuksiin tarvittavia resursseja.

STABILITEETTITARKASTELUN KULKUKAAVIO



Kuva 8.2. Vantaan kaupungin alueella tehtävien stabiliteettitarkastelujen ohjeellinen kulkukaavio.

LÄHDELUETTELO

- /1/ Suomen Rakennusinsinöörien Liitto. RIL 157-2 Geomekaniikka II. Helsinki 1990.424 s.
- /2/ <http://www.vhvsy.fi/?p=vantaa&l=fi>
- /3/ <http://www.ymparisto.fi/default.asp?contentid=140547&lan=fi>
- /4/ <http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=19341&lan=fi>
- /5/ <http://www.ymparisto.fi/default.asp?node=18212&lan=fi>
- /6/ <http://www.ymparisto.fi/default.asp?node=22672&lan=fi>
- /7/ <http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=105628&lan=sv>
- /8/ Helenelund K.V. Maarakennustekniikka 137. Espoo 1967, Otakustantamo. 278s.
- /9/ Huang Yang H. Stability Analysis of earth slopes, New York 1983, Van Nostrand Reinhold Company Inc. 305s.
- /10/ Länsivaara, T., Lehtonen, V. and Mansikkamäki, J. Failure induced pore pressure, experimental results and analysis. Tampere University of Technology, Tampere, Finland
- /11/ Maaperäkuvaus ja rakennettavuusselvitys Tammisto, kortteli 50036, 2003, Vantaan kaupunki
- /12/ Vallinkylä – alueselvitys, 21.9.2005 4.3.2012 [www], saatavissa: http://www.vantaa.fi/instancedata/prime_product_julkaisu/vantaa/embeds/vantaa_wwwstructure/30494_080900_Vallinkyla_selvitys_21.09.2005.pdf
- /13/ Vantaa alueittain 2010 – Korson suuralue, yleisselvitys vantaan asuinalueista, 4.3.2012, [www], saatavissa: http://www.vantaa.fi/instancedata/prime_product_julkaisu/vantaa/embeds/vantaa_wwwstructure/73549_Korso_korjattu.pdf
- /14/ Vantaa alueittain 2010 – Kivistön suuralue, 30.3.2012[www] saatavissa : http://www.vantaa.fi/instancedata/prime_product_julkaisu/vantaa/embeds/vantaa_wwwstructure/73544_Kivisto_korjattu.pdf

- /15/ Vantaa alueittain 2010 – Aviapoliksen suuralue, 29.3.2012[www] saatavissa :
http://www.vantaa.fi/instancedata/prime_product_julkaisu/vantaa/embeds/vantaa_wwwstructure/73546_Aviapolis_korjattu.pdf
- /16/ Länsivaara T. Jännityspolkuohjaus kolmiaksaalikokeessa. Diplomityö. Tampereen teknillinen korkeakoulu. 1992. 123s.
- /17/ http://www.helsinki.fi/~oruth/kivikauden_vantaanjoki.html
- /18/ Vantaan kaupunki, Rekolanoja – eilen, tänään, huomenna. [www]
http://www.vantaa.fi/instancedata/prime_product_julkaisu/vantaa/embeds/vantaa_wwwstructure/30491_rekolanoja21112005_72.pdf
- /19/ Suomen rakennusmääräyskokoelma B3, Pohjarakenteet, Määräykset ja ohjeet 2004, [www], <http://www.edilex.fi/data/rakentamismaaraykset/b3.pdf>
- /20/ http://www.hel2.fi/hkr/julkaisut/ohjeet/aluesuunnitelman_lahtoaineisto/vantaanjoen_tulvantorjunta_suunnitelma.pdf
- /21/ Cheng Y.M. Slope 2000 Theory Manual. Department of Civil and Structural Engineering. Hong Kong Polytechnic University, 2005
- /22/ Suomen Rakennusinsinöörien Liitto. RIL 157-1 Geomekaniikka I. Helsinki 1985. 364 s.
- /23/ Mansikkamäki J. Olemassa olevien ratapenkereiden stabiliteetin laskenta elementtimentelmällä. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. 2007
- /24/ <http://www.ce.ufl.edu/~mih/courses/CES4141/Notes%2062%20-%20Basic%20Finite%20Element%20Theory.pdf>
- /25/ <http://www.water.tkk.fi/wr/tutkimus/thesis/Haapala2008.pdf>
- /26/ Brazelton R., Mesri G., Terzaghi K., Soil mechanics In Engineering Practice, John & Son Inc. Kanada, 1996. 565s.
- /27/ http://alk.tiehallinto.fi/thohje/pdf2/yleiset_perusteet.pdf
- /28/ puhelinkeskustelut geotekniikan erikoisasantuntija Vesa Oksasen kanssa.

/29/ Radan stabiliteetin laskenta, olemassa olevat rakenteet, Ratahallintokeskus, Helsinki, 2005. [www]
http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf4/rhk_b15_radan_stabiliteetin_laskenta.pdf

/30/ Saarelainen S. Vantaan savialueiden painumisominaisuuksista. Vantaan kaupunki rakennusvirasto, 1978.




Työssä käytetyt ilmakuvat, viistoilmakuvat ja karttakuvien pohjakartat ovat peräsin Vantaan karttapalvelusta. Kartankäyttö- ja julkaisulupa Nro 4/201

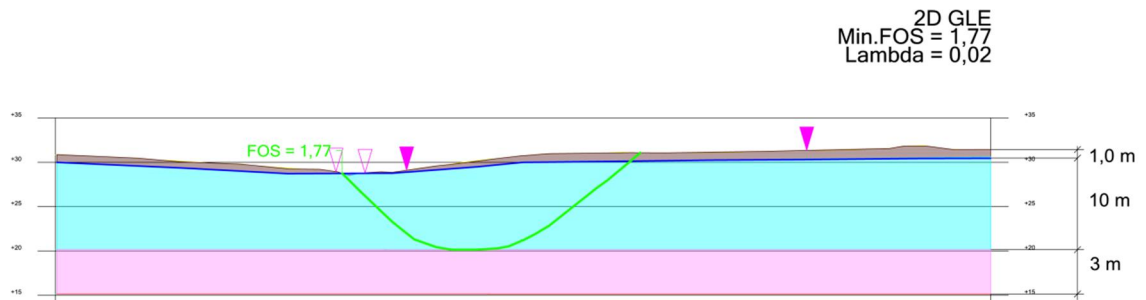
2. Tarvittavien tutkimusten määrittäminen

Leikkaus C-C

Kun leikkausten sijainnit on valittu, on kustakin linjasta tehty leikkauskuva laserkeilausaineistoon perustuen. Ensimmäisessä vaiheessa käytetään tässä työssä esitettyjä maalajikerroksia laskelmien tekemiseen, maakerrokset ja laskentaparametrit on esitetty Taulukossa 9.1.

Taulukko 9.1. Laskentaparametrit ja maakerrokset alustaviin, suljetulla leikkauslujuudella tehtäviin laskelmiin.

Parametrit alustaviin tarkasteluihin suljetulla leikkauslujuudella		Tilavuus-paino	Kitka-kulma	Suljettu leikkauslujuus
LASKENTAPARAMETRIT		γ kN/m^3	ϕ' kPa	S_u kPa
	Kuivakuori	17	0	30
	Savi	15	0	10
	Siltti	16	28	0

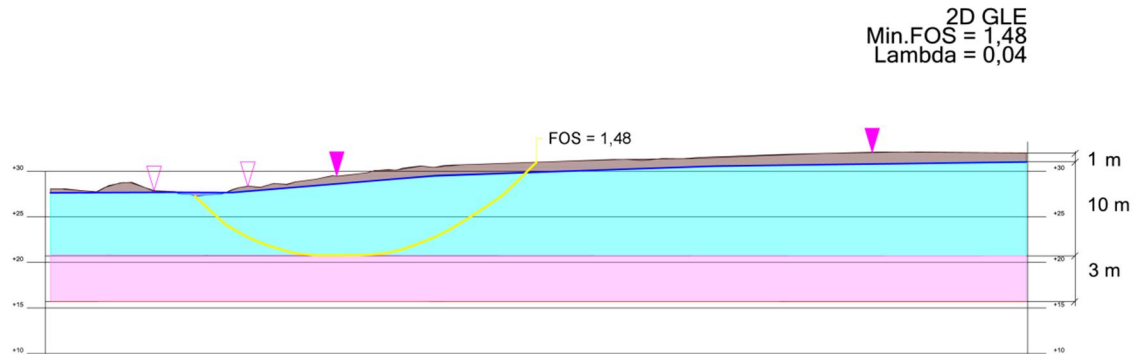


Kuva 9.2. Leikkauksen C-C alustava tarkastelu arvioituilla maakerroksilla ja suljetulla leikkauslujuudella.

Kuvassa 9.2 esitettyssä alustavassa tarkastelussa varmuudeksi sortumista vastaan GLE-menetelmällä, vapaata liukupintaa käyttäen on laskelmin saatu 1,77. Tämä on lähellä vaadittua 1,8 varmuustasoa, joten tutkimuksia voidaan ajatella tehtäväksi paino- ja siipikairauksia menetelmänä käyttäen. Tässä tapauksessa tulisi minimissään tehdä painokairaukset kahdesta pisteestä, läheltä ja kauempaa uomasta sekä siipikairaus kauempaa uomasta tehdystä painokairauspisteestä. Mikäli haluttaisiin hyödyntää mahdollista uoman lujittumista, tulisi siipikairaus tehdä myös uoman vierestä. Puromaisessa ympäristössä tämä ei välttämättä tuota toivottua lujuuden kasvua joten tässä leikkauksessa on tutkittu vain leikkauslujuutta uomasta kauempana. Painokairauksia on tehtävä vähintään kaksi kappaletta maalajikerrosten selvittämiseksi. Kuvassa 9.3 on esitetty leikkauskuva, jossa maanpinta perustuu tehtyyn vaaitukseen ja maakerrosrajat tehtyihin kairauksiin.

Leikkaus A-A




Toisen tutkittavan leikkauksen osalta tehdään samanlainen alkutarkastelu maastomallin avulla piirrettyä leikkausta käyttäen. Tehty alustava leikkauskuva maalajeineen on esitetty kuvassa 9.3.

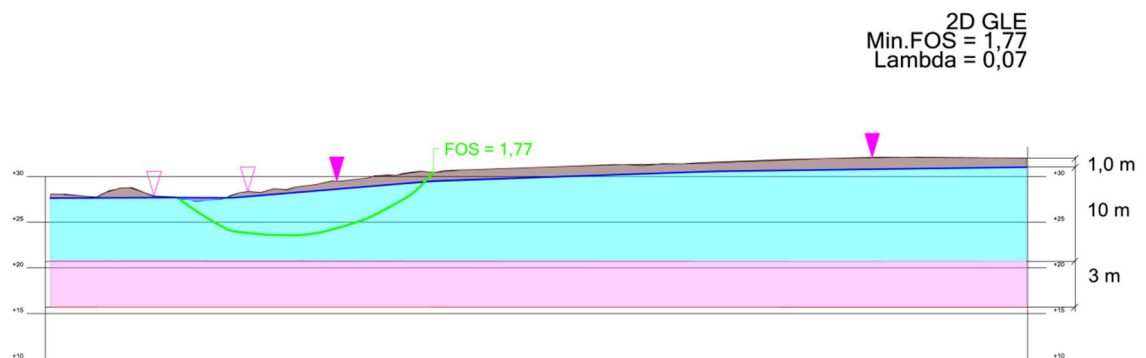


Kuva 9.3. Leikkauksen A-A alustavat tarkastelu arvioituilla maakerroksilla ja suljetulla leikkauslujuudella.

Alustavassa tarkastelussa suljetulla leikkauslujuudella laskettaessa kokonaisvarmuus jää selvästi tavoitetasosta. On siis oletettavaa, ettei siipikairalajuuden jäädessä tyypilliselle tasolle, voida saavuttaa vaadittua varmuutta. Seuraavaksi on syytä tarkastella samaa tapausta keskimääräisillä tehokkailla parametreilla ja arvioida onko menetelmän avulla mahdollista yltää vaadittuun varmuustasoon.

Taulukko 9.2. Laskentaparametrit ja maakerrokset alustaviin, tehokkailla parametreilla tehtävään laskelmiin

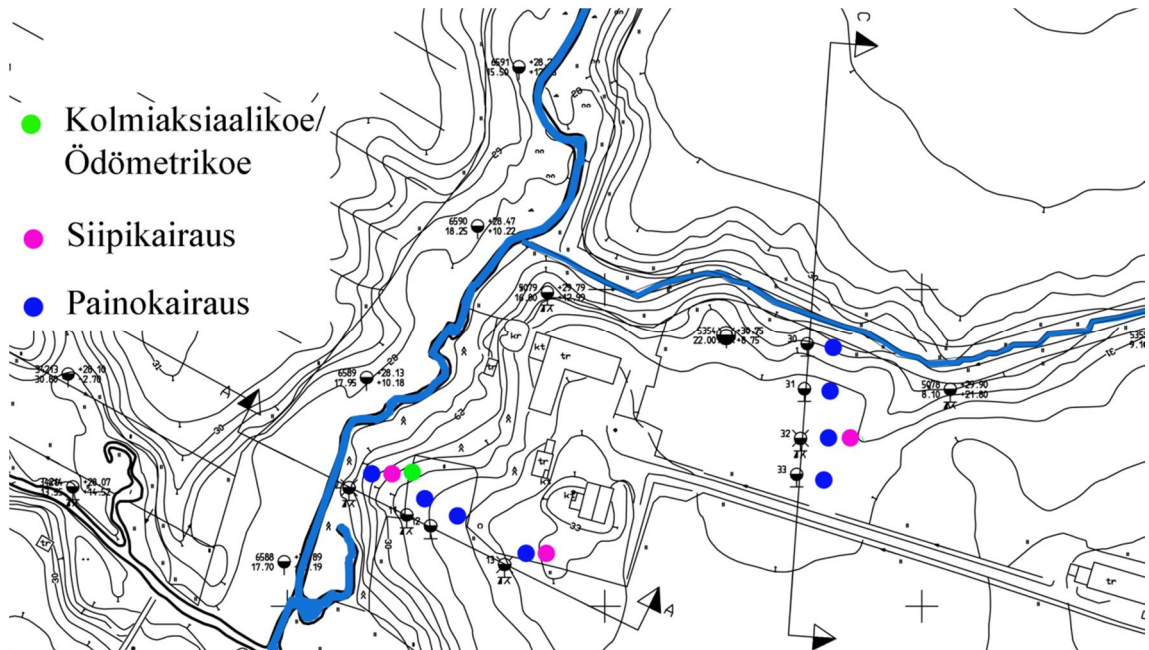
Parametrit alustaviin tarkasteluihin kitkakulmalla		Tilavuus-paino	Kitka-kulma	Suljettu leikkauslujuus	Huokospaine- parametri
LASKENTAPARAMETRIT		γ kN/m^3	ϕ' kPa	S_u kPa	r_u'
	Kuivakuori	17	0	30	
	Savi	15	24	0	0,2
	Siltti	16	28	0	



Kuva 9.4. Leikkauksen A-A alustava tarkastelu arvioituilla maakerroksilla ja tehokkaila laskentaparametreilla.

Alustava tarkastelu varovaisella kittakulmalla laskettaessa tuottaa hyvin lähelle vaaditun 1,80 varmuustason. Tämän vuoksi kohteella olisi järkevää ottaa häiriintymätön näyte ja tehdä laboratoriokokeet lujuusparametrien määrittämiseksi.

Alustavien laskelmien perusteella on kohteella päädytty tekemään kuvassa 9.5 esitetyt pohjatutkimukset leikkausten A-A ja C-C osalta. (B-B vastaava kuin A-A)

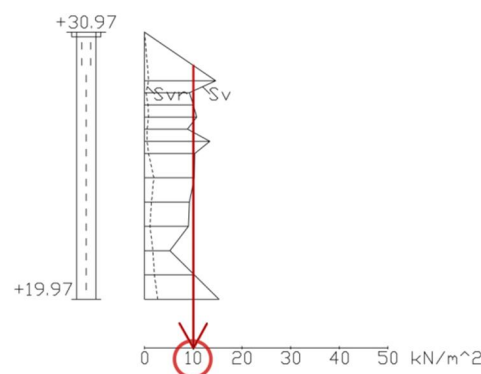


Kuva 9.5. Esimerkkikohteessa ohjelmoidut pohjatutkimukset kartalla.

Tässä tapauksessa otetaan häiriintymätön näytesarja määritetyn liukupinnan alueelta, eli uoman läheisyydeltä. Painokairauksen perusteella määritetään savikerroksen paksuus ja tehdään ödometri- ja kolmiakσιαalikoe savikerroksen puolivälistä otetusta näytteestä.

3. Laskentaparametrien määrittäminen

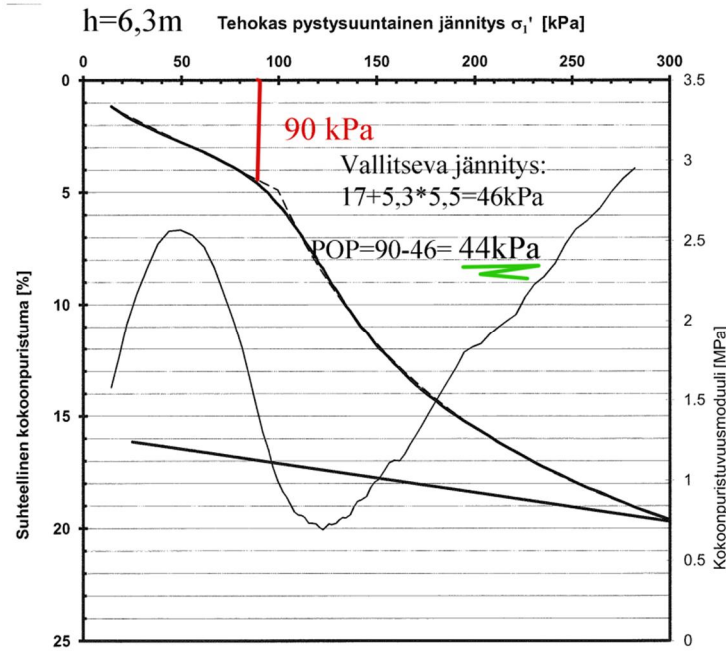
Pohjatutkimusten perusteella määritetty saven suljettu leikkauslujuus on tehty suoraan siipikairauksen tulosten perusteella. Siipikairauksen kairausdiagrammi on esitetty kuvassa 9.6.



Kuva 9.6. Leikkaiksesta C-C tehdyn siipikairauksen kairausdiagrammi. Keskimääräinen leikkauslujuus 10 kPa.

Yli 10 metrin matkalla vakioksi määritetty suljettu leikkauslujuus ei ole teoriassa pätevä, mutta tutkimuksen perusteella suurempaan leikkauslujuuden käyttöön ei ole perusteita. Leikkauksessa C-C laskelmat tehdään alustavien tarkasteluiden perusteella suljettuun leikkauslujuuteen perustuen.

Leikkauksesta A-A laskelmat tehdään tehokkailla parametreilla, joiden määrittämistä varten tarvitaan kolmiaksiaalikokeita. Kolmiaksiaalikokeen sellipaineiden määrittämistä varten on savikerroksen puolivälistä tehty ödometrikoe. Ödometrikokeen tulos on esitetty kuvassa 9.7.



Kuva 9.7. Savikerroksen puolivälistä tehdyn ödometrikokeen tulokset leikkauksesta A-A.

Ödometrikoe osoittaa saven olevan ylikonsolidoitunutta. Tämä tulee ottaa huomioon kolmiaksiaalikokeita suunniteltaessa, jotta kokeet tehtäisiin normaalikonsolidoituneella alueella. Tässä tapauksessa ödometrikokeita on tehty leikkauksen A-A osalta savikon puolivälistä kahdella eri sellipaineella. (Tavallisesti koe tehdään kolmella eri sellipaineella samasta syvyydestä mutta tämän tutkimustyön yhteydessä päädyttiin hieman poikkeaviin ratkaisuihin. Samalta alueelta tehtiin toinenkin kolmiaksiaalikoe samaisesta savikerroksesta joten tässä tapauksessa tästä savikerroksesta on tehty neljä eri koetta; 2kpl 80kPa ja 2kpl 100 kPa sellipaineilla.) Sopivaa sellipainetta arvioitiin ödometrikokeella määritetyn konsolidaatiojännityksen avulla seuraavasti:

Lepopainekertoimen K_0 arvioidaan normaalikonsolidoituneen saven Jakyn K_0 laskentakaavaa käyttäen (oletetaan kitkakulman olevan luokkaa 25°)

$$K_0 = (1 - \sin\varphi) = (1 - \sin 25^\circ) = 0,58 \quad (9.1)$$

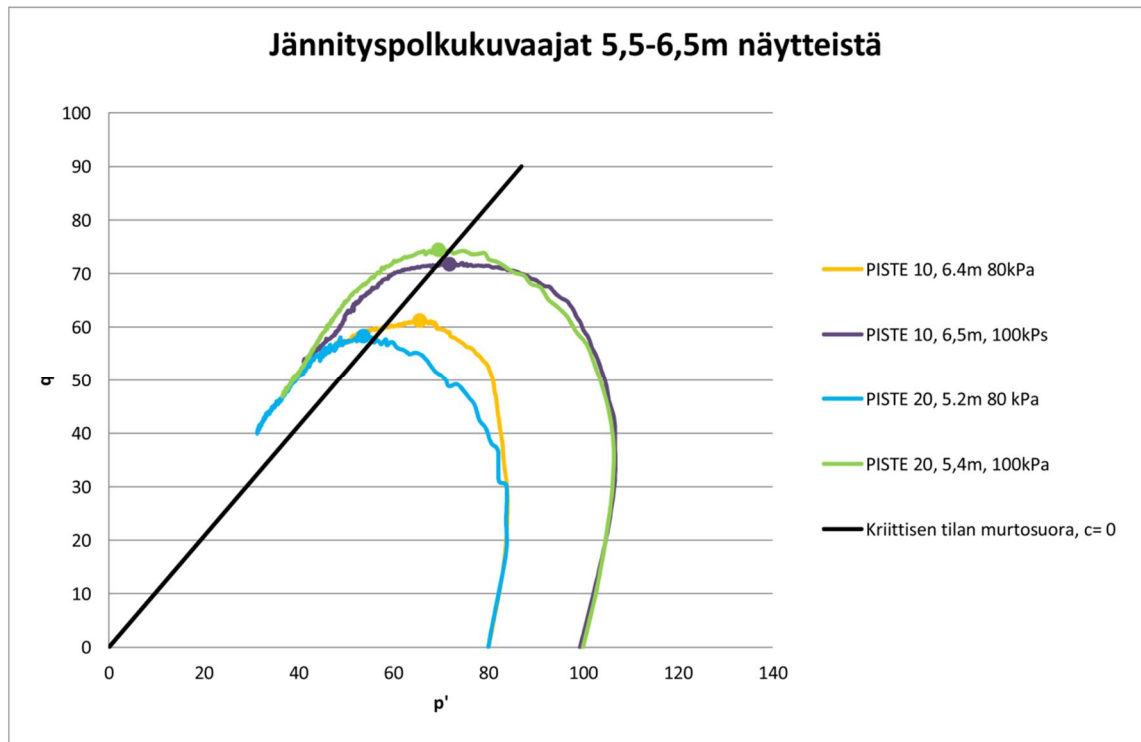
Vaakasuuntaisia jännityksiä arvioitiin lepopainekertoimen K_0 avulla

$$\sigma'_2 = \sigma'_3 = K_0 * \sigma'_1 = 0,58 * 90 = 53 \text{ kPa} \quad (9.2)$$

Vallitsevaa keskimääräistä jännitystä p' arvioidaan edelleen kaavalla 9.3.

$$p' = \frac{\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3}{3} = \frac{90 + 2 * 53}{3} = 65 \text{ kPa} \quad (9.3)$$

Koska kolmiakσιαalikokeet halutaan tehdä varmasti normaalikonsolidoituneelta alueelta, valitaan tässä tapauksessa ensimmäisen kokeen sellipaineeksi määritetty 80 kPa. Toinen koe tehdään 100 kPa sellipaineella. Kuten mainittu, normaalisti tehtäisiin vielä kolmas koe eri sellipaineella mutta tässä tapauksessa on olemassa tuloksia kahdesta eri pisteestä, kahdella eri sellipaineella. Informaatiota kitkakulman määrittämiseen on siis riittävästi. Kolmiakσιαalikokeiden tulokset on esitetty kuvassa 9.8.



Kuva 9.8. Esimerkkikohteelta tehtyjen kolmiakσιαalikokeiden jännityspolkukuvaajat p' - q -koordinaatistossa

Kolmiakσιαalikokeiden tulosten perusteella on saven kitkakulmaksi määritetty 26° . Määrittäminen on tehty jännityspolkukuvaajista tässä työssä esitetyllä tavalla, kaavojen 6.1...6.4 avulla.

4. Laskelmat pohjatutkimuksin määritetyillä parametreilla

Tehtyjen pohjatutkimusten ja laboratoriokokeiden perusteella Vallinojalle määritettiin Taulukossa 9.3. esitetyt maakerrokset ja niiden laskentaparametrit.

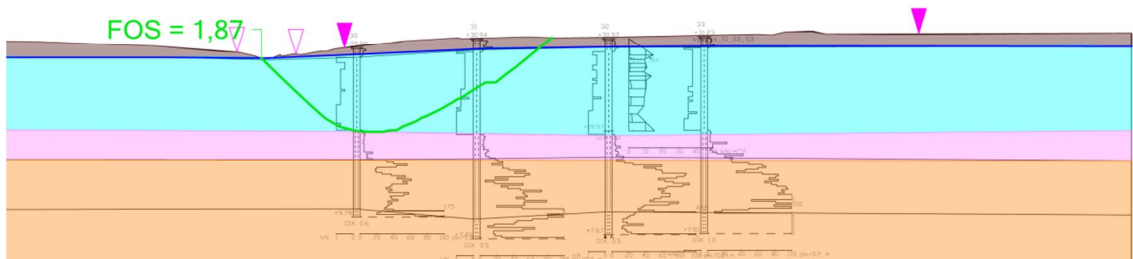
Taulukko 9.3. Pohjatutkimusten ja laboratoriotulosten perusteella määritetyt maakerrokset ja laskentaparametrit.

PIRTTIRANTA		Tilavuuspaino	Koheesio	Kitkakulma	Suljettu leikkauslujuus	Lujuuden kasvu	Huokospaineparametri
LASKENTAPARAMETRIT		γ kN/m ³	c' kPa	φ' kPa	S_u kPa	$\Delta s_u/m$	ru'
	Kuivakuori	17	0	0	30		0
	Savi	15.5	0	26	0		0.19
	Siltti	16	0	28	0		0
	Pohjamaa	18	0	34	0		0

Leikkaus C-C

Leikkauksessa tehdyn siipikairauksen perusteella saven suljettuna leikkauslujuutena käytetään 10 kPa, eli samaa lujuutta kuin alustavissa tarkasteluissa. Laskelmat tehdään kuitenkin käyttäen kartoitettua maanpintaa ja kairaamalla määritettyjä maakerrosrajoja. Laskelman tulos on esitetty kuvassa 9.9.

2D GLE
Min.FOS = 1,87
Lambda = 0,02

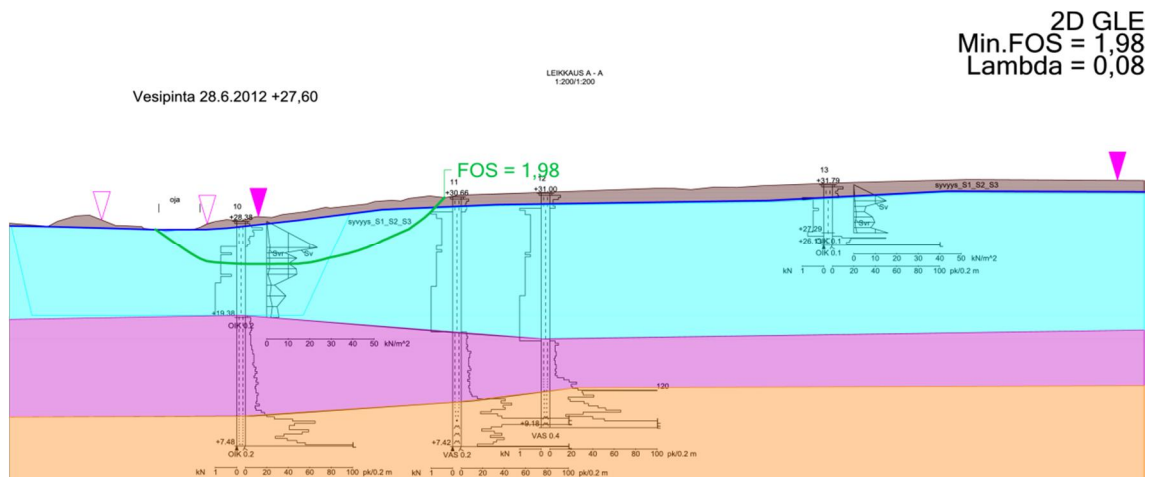


Kuva 9.9. Leikkauksen C-C laskelma tehtyjen pohjatutkimusten ja maastomittausten perusteella, suljetulla leikkauslujuudella laskettuna.

Tarkoilla maakerrosrajoilla ja maaston pinnanmuodoilla tehdyn siipikairalujuuteen perustuvalla laskelmalla päästään tämän leikkauksen osalta riittävään varmuustasoon. Riittävään varmuustasoon päästään vaikka siipikairalujuus on epälooginen ja indikoi lujuuden määrittämisessä olevan häiriötä, jolloin käytetyt parametrit ovat varman puolella. Tämän leikkauksen osalta laskelmilla on osoitettu uomalle riittävä stabiliteetti siipikairaustulokseen perustuen.

Leikkaus A-A

Kolmiakσιαalikokeessa määritetty kitkakulma on 26° , eli hieman alustavissa tarkaste-luissa käytettyä kitkakulmaa suurempi. Tällöin myös käytettävää huokospaineparamet-ria tulee pienentää, jotta se vastaisi käytettävää kitkakulmaa. Myös leikkaukseen päivi-tetään tehdyt kairaukset ja vaaittu maanpinta. Laskelmat laboratoriossa määritetyillä parametreilla on esitetty kuvassa 9.10.



Kuva 9.10. Leikkauksen A-A laskelma tehtyjen pohjatutkimusten ja maastonmittausten perusteella, tehokkailla parametreilla.

Laskettaessa laboratoriossa määritetyillä, oletusarvoa hieman suuremmilla lujuuspara-metreilla, päästään laskelmissa yli vaaditun 1,80 varmuustason. Tuloksiin vaikuttaa sekä muuttunut geometria että parantuneet laskentaparametrit.

Tämä esimerkki oli esitys siitä, kuinka pohjatutkimuksia voidaan ohjelmoida tehokkaasti ja tarpeen mukaisesti, mikäli lähtötietoja hyödynnetään ja tehdään alustavia tarkasteluja varsin yksinkertaisten lähtötietojen varassa. Tässä esimerkissä tarkasteltiin luiskan vakavuutta koko luiskan alueella, joten alle 1,80 varmuuksiin päädyttiin varsin lähellä uomaa. Mikäli tarkastelurajaa siirretään kauemmaksi uomasta, päästään riittä-vään varmuustasoon myös tarkasteltaessa tilannetta ainoastaan suljettuun leikkauslujuu-teen perustuen. Olennaista siis on, kuinka lähelle uomaa halutaan rakentaa, ja kuinka paljon tehdä ja teettää pohjatutkimuksia. Pohjatutkimusten määrän ja laadun tulisi kor-reloida tulevan rakentamisen ja uoman monimuotoisuuden kanssa.